REPOSIT



Umweltschutz in der Luftfahrt – Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion

Dieter Scholz

2021

Publikationsstatus: Publizierte Version / keine Begutachtung geplant

Typ des Dokumentes: Bericht

Empfohlene Zitierung:

SCHOLZ, Dieter, 2021. *Umweltschutz in der Luftfahrt – Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion*. Bericht. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Aircraft Design and Systems Group (AERO).

Zitierlink:

DOI: https://doi.org/10.48441/4427.225
Handle: https://hdl.handle.net/20.500.12738/11261

Nachnutzung:

Das Werk ist lizenziert unter Creative Commons *Namensnennung* 4.0 International (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0



Dieter Scholz

Umweltschutz in der Luftfahrt

Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion

Kurzreferat

Zweck: Dieser Bericht mit Hintergründen zum Umweltschutz in der Luftfahrt ist ein Erklärtext. Er richtet sich an interessierte Laien, die bereit sind, sich in Sachverhalte einzuarbeiten jenseits grober Vereinfachungen. Der Text soll ein unabhängiges eigenes Verständnis ermöglichen.
Methodik: Der Text basiert auf einem Literaturstudium, sowie auf eigenen Berechnungen.
Ergebnis: Die Emissionen der Zivilluftfahrt sind seit den Anfängen der Fliegerei bisher exponentiell gewachsen mit einer Verdoppelung alle 20 Jahre. Der Anteil der Zivilluftfahrt an den Emissionen des Verkehrssektors beträgt 13,9 % in der EU. Der Anteil steigt. 1 % der Weltbevölkerung verursacht 50 % der CO2-Emissionen der Zivilluftfahrt. Die Verteilung ist daher extrem ungleich. Kraftstoffverbrauch und CO2-Emissionen sind gekoppelt. Aus der Masse von einem kg Kerosin werden 3,15 kg CO2, aber das Klimadesaster kommt vor dem Ende der fossilen Energien. "Zero Emission" wird durch die Luftverkehrswirtschaft propagiert, scheint aber nur ein Ablenkungsmanöver zu sein. Die EU wird konkret: Ende der kostenlosen Emissionszertifikate für die Luftfahrt, Steuern auf Kerosin und Beimischung nachhaltige Flugkraftstoffe. Aktuell werden zwei Vorschläge für neue Energieträger in der Luftfahrt diskutiert: flüssiger Wasserstoff (LH2) und synthetisches Kerosin (E-Fuel). Aufgrund der Nicht-CO2-Effekte bleibt die Klimawirkung. Durch Umwandlungsverluste wird erheblich mehr Ausgangsenergie benötigt. E-Fuels funktionieren nur zusammen mit der Abscheidung von CO2 aus der Luft. Die Nutzung der regenerativen Energie zur Substitution von Kohlekraftwerken vermeidet 15-mal mehr CO2 als bei der Nutzung im Flugzeug. Der Kraftstoffverbrauch pro Sitzplatz steigt stark an, wenn sehr kurze oder für das Flugzeug sehr lange Strecken geflogen werden. Die Nicht-CO2-Effekte durch Stickoxide und Kondensstreifen (mit Zirrenbildung) verursachen eine Klimawirkung der Luftfahrt etwa dreimal so groß, wie durch das CO2 allein. Die Nicht-CO2-Effekte könnten stark reduziert werden, wenn etwas tiefer (und langsamer) geflogen wird. Das ginge ab sofort, wird aber nicht gemacht. Das Flugzeug hat gegenüber dem Zug etwa die 18-fache Umweltwirkung. Ohne eine Reduktion der Passagierzahlen kann die Luftfahrt definierte Klimaziele nicht erreichen. Ein Wertewandel in der Gesellschaft könnte das Wachstum der Luftfahrt beenden.
Soziale Bedeutung: Der Wertewandel kann nicht allein auf Flugscham basieren, sondern muss langfristig durch ein Verständnis der Zusammenhänge getragen werden. Dies unbeeindruckt von den Darstellungen industrieller Interessengruppen. Der vorliegende Text liefert dahingehend einen unabhängigen Beitrag zur Diskussion.

Inhalt

Einleitung

Wir hoffen langsam aus der Corona-Pandemie herauszukommen. Damit könnte der Flugverkehr an der Stelle weiter machen, wo er im Jahr 2020 ein jähes Ende fand. Doch war da nicht etwas mit Klimawandel? Flugscham? Können wir wirklich in Zeiten nachgewiesener Erderwärmung mit gutem Gewissen wieder so fliegen wie früher? Nach Corona sind wir jedenfalls um eine Erkenntnis reicher. Das Undenkbare ist möglich. Flugzeuge können tatsächlich reihenweise am Boden stehen. Das hatten vor Corona schon Organisationen wie Stay Grounded (https://www.stay-grounded.org) propagiert, waren mit dieser Forderung aber kaum ernst genommen worden. Nach Corona hat sich die Diskussionsbasis verschoben. Die EU hat mit dem Maßnahmenpaket "Fit for 55" den "Green Deal" konkretisiert. In Deutschland werden einer Politik mit Umweltschwerpunkt Chancen eingeräumt, mehrheitsfähig zu werden. Starkregenereignisse zeigen, dass der Klimawandel bei uns angekommen ist. Fragen zur Luftfahrt sind Teil der Nachrichten geworden. Sollen Kurzstreckenflüge durch Zugfahrten ersetzt werden? Viele Bürger beschleicht das Gefühl, dass auch der eigene Lebensstil hinterfragt werden muss. Das Raumschiff Erde ist endlich in seinen Abmessungen. Die Atmosphäre ist irgendwann voll von CO2 und anderen Treibhausgasen. Ein klimarelevanter Vorgang stößt dann den nächsten an und das Klima kippt, wie eine Reihe Dominosteine.

Sind die Emissionen des Luftverkehrs relevant?

Die globale Luftfahrt hatte bis 2018 32,6 Milliarden Tonnen CO2 emittiert (Lee 2021). Das entspricht den globalen jährlichen Gesamtemissionen an CO2 in 2018 (Wikipedia 2021). Der Luftverkehr ist über Jahrzehnte recht stabil mit 5 % pro Jahr gewachsen (ICAO 2012). Das entspricht einer Verdoppelung alle 15 Jahre ($1{,}05^{15} = 2{,}1$). Der Kraftstoffverbrauch pro Kopf und Kilometer konnte zwar jedes Jahr um 1,5 % gesenkt werden. Es blieb damit aber ein Wachstum von 3,5 % pro Jahr, was einer Verdoppelung der CO2-Emissionen alle 20 Jahre entspricht ($1{,}035^{20} = 1{,}99$) (Lee 2021). Siehe dazu Bild 1.

Die Betrachtung der Zahlen des Flugverkehrs von den Anfängen der zivilen Luftfahrt (vor dem zweiten Weltkrieg) bis 2020 zeigt, dass es sich hier um exponentielles Wachstum handelt. Wie bedrohlich **exponentielles Wachstum** ist, wurde uns am Beispiel von SARS-CoV-2 erklärt. Innerhalb bestimmter Zeiten kommt es zu einer Verdoppelung (time to double). Aus 2 wird 4, dann 8, 16, 32. Was wird verdoppelt? Beim Luftverkehr liegt die Verdoppelung im Verkehrsaufkommen und damit beim CO2-Ausstoß. Das CO2 sammelt sich aber in der Atmosphäre an und bleibt dort für mehrere hundert Jahre. Wenn aus 2 im ersten Jahr 4 im zweiten Jahr werden, dann sind das am Ende des zweiten Jahres schon 6 Einheiten CO2 in der Atmosphäre gefolgt von 14 (6+8), 30 (14+16), 62 (30+32). Das exponentielle Wachstum kann auch in Prozent pro Jahr ausgedrückt werden. Mit der Zinseszinsformel lässt sich dann

ausrechnen nach wie viel Jahren es z. B. zu einer Verdoppelung kommt (siehe oben). Durch Zinsen können einem "die Schulden über den Kopf wachsen". Entsprechend ist es beim exponentiellen Wachstum der Emissionen der Luftfahrt. Hinzu kommen positive Rückkopplungsmechanismen im Klimasystem, bei denen sich ein Anfangsimpuls verstärkt. Es gibt Kipp-Punkte (Tipping-Points). Werden diese erreicht, dann wird eine Kettenreaktion ausgelöst und das Klima kippt genauso wie eine Reihe Dominosteine (Umweltbundesamt 2008).

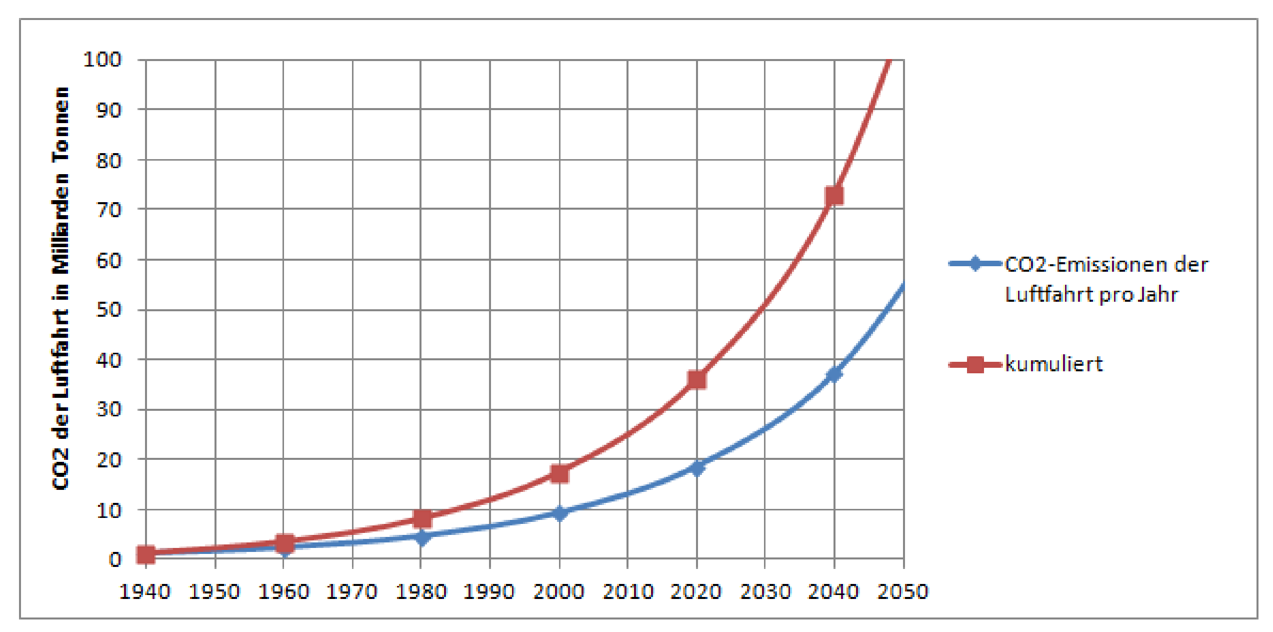


Bild 1: Einfache Darstellung des exponentiellen CO2-Wachstums der Luftfahrt bis 2019 fortgeschrieben bis 2050 unter der Annahme von einem weiteren Wachstum des Luftverkehrs von 5 % pro Jahr und Einsparungen im Kraftstoffverbrauch pro Kopf und Kilometer von 1,5 % pro Jahr. Dies führt zu einer Verdoppelung der CO2-Emissionen alle 20 Jahre. Luftfahrtkrisen haben sich in der Vergangenheit im Kurvenverlauf kaum bemerkbar gemacht (ICAO 2012). Es wird aber prognostiziert, dass eine Rückkehr zum bekannten Luftverkehrswachstum von 5 % nach Corona länger dauern könnte. Gezeigt ist vereinfacht der kontinuierliche Verlauf.

Aber möglicherweise ist das alles gar nicht so schlimm, weil die CO2-Emissionen der Luftfahrt nur 2,4 % an allen menschengemachten CO2-Emissionen ausmachen (Lee 2021)? Bekanntlich kann man Statistiken immer so einsetzen, wie es gerade vorteilhaft erscheint und 2,4 % klingt erst einmal nicht so viel. Man schätzt aber, dass 80 % der Menschen auf der Erde noch nie geflogen sind (OurWorldInData 2020). Im Durchschnitt macht jede Person auf Erden einen halben Flug pro Jahr. In Europa sind es 1,3 Flüge pro Jahr (errechnet nach CityPopulation 2020). Nach dem allgemeinen Pareto-Prinzip (80/20-Regel) müssten 20 % der Weltbevölkerung für 80 % der Emissionen verantwortlich sein. In der Luftfahrt scheint die Verteilung aber ungleicher zu sein als sonst schon, denn es wären 20 % der Weltbevölkerung für 100 % der Emissionen verantwortlich. So gesehen lesen sich die 2,4 % jetzt anders. **Die Luftfahrt ist "nur" für 2,4 % der menschengemachten CO2-Emissionen verantwortlich, weil die meisten Menschen auf der Erde so arm sind, dass sie noch nie mit einem Flugzeug fliegen konnten.**

Nach einer Darstellung zum "Green Deal" (EU 2019a) entfallen 25 % der Treibhausgas-emissionen in der EU auf den Verkehrssektor. **Der Anteil der Zivilluftfahrt an den Emissionen des Verkehrssektors beträgt 13,9 %** (Bild 2). Das wären dann in der EU 3,5 % (0,25 · 13,9 %) der von Mensch gemachten Treibhausgasemissionen. Auch die Wissenschaft (Lee 2021) bestätigt, dass der zivile **Luftverkehr mit 3,5 % an der menschengemachten Erderwärmung beteiligt** ist, wenn man neben den CO2-Effekten auch die Nicht-CO2-Effekte einbezieht. **Der Luftfahrtanteil an den Emissionen stieg stetig an**, weil das Wachstum der Luftfahrt stärker war, als das Wachstum anderer Bereiche.

Anteil der Treibhausgasemissionen
je Verkehrsträger (2017)
Schiene
0,5 %
Andere
0,5 %
Schiff
13,4 %
Zivilluftfahrt
13,9 %
Straße
71,7 %

Bild 2: Der Anteil der Zivilluftfahrt an den Emissionen des Verkehrssektors beträgt 13,9 % (EU 2019a).

Neben den 13,9 % der Luftfahrt, verursacht die Bahn mit nur 0,5 % den kleinsten Einzelanteil, der Straßenverkehr mit 71,7 % den größten Anteil an den Emissionen des Verkehrssektors in der EU. Angesichts dieser Zahlen könnte man sich fragen, warum die Luftfahrt so stark in der Kritik steht. Ohne an dieser Stelle auf technische Details einzugehen, ist zunächst festzustellen, dass der Straßenverkehr einfach zur täglichen Fortbewegung gehört, während Flüge im Vergleich dazu dann doch immer noch besondere Einzelereignisse im Leben sind (siehe oben). Der **Anteil der Luftfahrt ist also "erheblich"**. Das liegt auch an den hohen Fluggeschwindigkeiten, die lange Flugstrecken in begrenzt verfügbarer Zeit ermöglichen. **Mit keinem anderen Verkehrsmittel können wir in einer Stunde pro Person so viel Emissionen erzeugen wie mit dem Flugzeug.** Der Verbrauch hängt primär von der Strecke ab. Lange Flugstrecken erfordern daher viel Energie und erzeugen viel CO2. Ein Hin- und Rückflug Frankfurt – New York (12400 km) kann schon der gesamten jährlichen Fahrleistung eines PKWs entsprechen.

Worum geht es – Kraftstoffverbrauch oder Emissionen?

Kraftstoffverbrauch und CO_2-Emissionen sind gekoppelt über die Zusammensetzung des Kraftstoffes, der aus Kohlenstoff und Wasserstoff in einem bestimmten Mischungsverhältnis besteht. Kohlenstoff verbrennt zu CO_2 und Wasserstoff verbrennt zu Wasser. Aus der Masse von einem kg Kerosin werden 3,15 kg CO_2. Wenn Wasserstoff verbrannt wird, kann kein CO_2 entstehen, weil Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält.

Es geht um Ressourcenverbrauch und um Erderwärmung. Wenn wir fossilen Kraftstoffverbrauch beklagen, dann drücken wir damit aus, dass wir zukünftigen Generationen keine Energie mehr übrig lassen, die vergleichsweise einfach aus der Erde genommen und genutzt werden kann. Wenn wir CO_2-Emissionen beklagen, dann drücken wir damit die Sorge aus, dass wir die Atmosphäre überlasten könnten, die irgendwann an ihre Grenze kommt. Ich stelle mir dazu zwei Fässer vor (Bild 3). Das eine Fass mit der Energie ist irgendwann leer und das andere Fass mit dem CO_2 wird irgendwann überlaufen. Wir pumpen von einem Fass in das andere Fass. Das kann auf Dauer nicht gut gehen, insbesondere dann nicht, wenn der Hahn dazwischen alle 20 Jahre auch noch doppelt so weit aufgedreht wird.

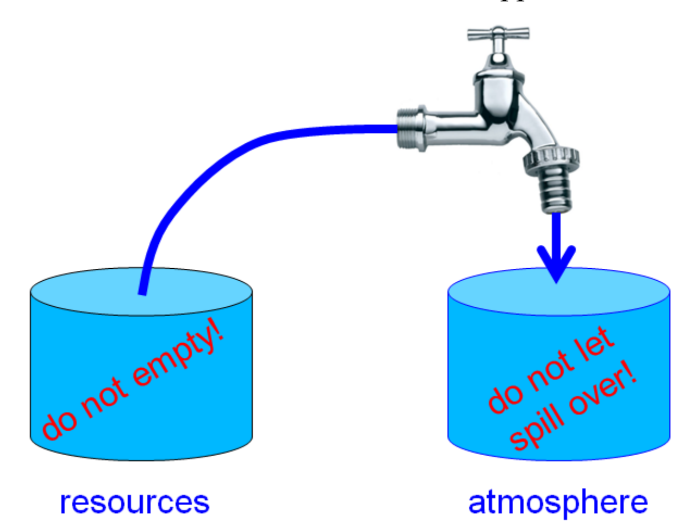


Bild 3: Zwei Fässer symbolisieren die endlichen fossilen Energievorräte und die endliche Aufnahmemöglichkeit der Atmosphäre.

Die **Atmosphäre** ist eine vergleichsweise dünne Luftschicht. 80 % der Luftmasse befindet sich unterhalb von etwa 11 km Höhe (Helmholtz 2021). Das sind nur 0,17 % des Erdradius.

Bei der **Erderwärmung** geht es neben den lokalen Effekten um die Erhöhung der global Mitteltemperatur der Luft in einer Höhe von 2 m gegenüber dem vorindustriellen Wert. 2020 lag die globale Temperatur um 1,25 °C höher als der vorindustrielle Wert (Copernicus 2020).

Die Erderwärmung hängt mit der **CO_2-Konzentration in der Luft** zusammen. Es besteht ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen der kumulierten Gesamtmenge an emittierten

Treibhausgasen und der dadurch verursachen Temperaturerhöhung – solange das Klimasystem nicht an einen Kipppunkt (Tipping-Point) kommt und sich dabei die Vorgänge von selbst beschleunigen. Auf das Volumen bezogen enthält die Luft rund 0,04 % CO2. Diese 0,04 Teile auf 100 Teile kann man auch ausdrücken als 400 Teile auf eine Millionen Teile. Das wird durch 400 ppm (parts per million) ausgedrückt. **In vorindustrieller Zeit lag die CO2-Konzentration bei 280 ppm**, 2021 waren es 420 ppm. Bei derzeitigen CO2-Emissionen **nimmt die CO2-Konzentration jedes Jahr um etwa 3 ppm zu** (1 ppm etsprechen etwa 10 Milliarden Tonnen CO2). Durch eine Verdoppelung von 280 ppm auf 560 ppm wird die Durchschnittstemperatur um ca. 3 Grad steigen. Nach dem Übereinkommen von Paris aus dem Jahr 2015 soll der Temperaturanstieg idealerweise auf 1,5 °C begrenzt werden gegenüber dem vorindustriellen Niveau. Das wäre dann bei 420 ppm – also bereits in 2021! (Das entspricht fast der Angabe aus Copernicus 2020). Wir müssten die CO2-Emissionen also heute bereits auf null herunter fahren. **Bei der 2-Grad-Grenze könnten wir auf 467 ppm kommen** und es blieben noch 15 Jahre bei heutigen CO2-Emissionen. Praxisorientiert könnten die Emissionen von heute 100 % auf 0 % in 30 Jahre (also etwa in 2050) linear heruntergefahren werden. Wenn wir jedoch noch alle fossilen Energiereserven verbrauchen würden (Kohle reicht noch für mehrere 100 Jahre), dann würde der CO2-Gehalt der Atmosphäre bis auf ca. 1600 ppm ansteigen, was nach schlichter Rechnung eine Temperaturerhöhung von 14 °C bedeuten würde. Durch diese Überlegung wird deutlich, dass ein Überlaufen des rechten Fasses (Bild 3) zuerst eintreten wird und damit kritischer ist. **Das Klimadesaster kommt vor dem Ende der fossilen Energien**. Die restlichen fossilen Energien müssen also ungenutzt im Boden bleiben und werden damit wertlos. (Mit Daten aus Wikipedia 2021 und dort aufgeführten Referenzen.)

Welche Klimaziele hat die Luftfahrt?

Die Luftverkehrswirtschaft hatte festgestellt, dass ein Wachstum der Luftfahrt ohne weitere Erklärungen nicht mehr vermittelbar ist und propagierte "**klimaneutrales Wachstum ab dem Jahr 2020**" (Carbon-Neutral Growth, CNG) (IATA 2009, ATAG 2012). Die Luftfahrt sollte weiter wachsen dürfen, die CO2-Emissionen sollten dabei auch weiter anfallen wie bisher, aber nicht mehr steigen. Der Hahn (in Bild 3) sollte ab dem Jahr 2020 nicht weiter aufgedreht werden. Die z. B. 3,5 % des jährlichen Wachstums, die nach der Kraftstoffeinsparung noch übrig bleiben, sollten kompensiert werden mit dem Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO, eine Sonderorganisation der UN). Hier ergaben sich aber gleich mehrere Probleme:

1. **CORSIA kompensiert nur das Wachstum**. Wenn der Hahn nur nicht weiter aufgedreht wird, dann wird es dabei bleiben, dass ein Fass irgendwann leer ist oder das andere überlaufen wird.
2. Der Start von CORSIA ist ab 2021 freiwillig. **Der eigentliche Start von CORSIA liegt im Jahr 2027** und das Ende ist bereits für 2035 vereinbart.

3. Die Wirksamkeit von CORSIA wird aus verschiedenen Gründen infrage gestellt (Transport&Environment 2021, EU 2021a).
4. Kritisch sind Forstprojekte zu sehen (Fern 2017), die das gebundene CO_2 ab dem Jahr 2037 wieder frei setzen dürfen (ÖkoInstitut 2020).
5. Im Jahr 2020 wurden die Regeln zu CORSIA aufgrund der Pandemie aufgeweicht (ICAO 2020). Das bedeutet, dass Zahlungen über CORSIA nur anfallen, wenn die Emissionen über denen von 2019 liegen. **Airlines werden daher die nächsten Jahre keine Emissionen über CORSIA kompensieren**.

Unter zunehmendem Druck der Umweltaktivisten erschien das Konzept "klimaneutrales Wachstum" als zu wenig überzeugend und wurde durch **das neue Konzept "Zero Emission"** ersetzt (Airbus 2020a, NLR 2021, ...). Die Luftfahrt soll mit regenerativen Energien betrieben werden. "Zero Emission" wird nicht weiter definiert und steht oft nur für "CO2-frei". Fest steht, dass das Ziel bis 2050 erreicht werden soll. Das lässt aktuell auch noch genug Zeit für ein uneingestandenes "weiter so". Das neue Ziel zusammen mit dem Einbruch der Passagierzahlen im Luftverkehr durch die Pandemie hat auch die Frage verdrängt, ob denn ab 2020 wenigstens wie versprochen kompensiert wird im Sinne von "klimaneutralem Wachstum" (CNG). Die ersten Monate in 2020 vor dem Lock Down haben gezeigt, dass einfach nichts passierte. Es wurde auf CORSIA verwiesen, aber CORSIA war noch nicht gestartet. Ziele und Jahre kommen und gehen, aber die CO2-Emissionen der Luftfahrt wachsen weiter. Eine Analyse der Ziele und Versprechen der Luftfahrt in Scholz 2020a.

Die Chemie der Atmosphäre ist kompliziert. Es geht eigentlich nicht um die Emissionen in die Atmosphäre hinein, sondern darum, wie die Atmosphäre auf die Emissionen reagiert. Es geht also darum, ob etwas **klimaneutral** ist. Aber **emissionsfrei** ("Zero Emission") ist schon besser als **CO2-frei**, weil es neben CO_2 auch andere klimaschädliche Gase gibt, die über ihre CO2-Äquivalente bewertet werden. Wenn eine Aktivität CO_2 emittiert, dann kann an anderer Stelle CO_2 gebunden werden. So können CO2-Emissionen kompensiert werden. Die Aktivität wird dadurch **CO2-neutral**.

Begriffe müssen präzise definiert und unterschieden werden. An Ende geht es immer darum, wie eine zunächst gute Idee wie "Zero Emission" in die Argumentation eingebaut wird. Gut ist es, wenn auf dem Weg zu "Zero Emission" der Schadstoffausstoss jedes Jahr reduziert wird. Ein zugeteiltes **Emissionsbudget muss eingehalten werden**. Wenn aber mit Hinweis auf "Zero Emission" im Jahr 2050 der Luftverkehr erst einmal weiter wächst und die Emissionen dabei trotz technischer Erfolge jedes Jahr weiter ansteigen und das Fass immer schneller füllen, dann ist das wenig hilfreich. Das Vorgehen wird auch nicht gerechtfertigt durch den Verweis auf das Jahr 2050 in dem beliebig viele emissionsfreie Flüge insgesamt keine Emissionen mehr verursachen werden, weil bis dahin das Emissionsbudget der Luftfahrt schon überschritten sein wird.

"Zero Emission" wird durch die Luftverkehrswirtschaft propagiert, scheint aber nur ein Ablenkungsmanöver zu sein. Dies wurde von InfluenceMap (https://www.InfluenceMap.org) aufgedeckt. Die Organisation berichtet über systematische Blockaden des Klimafortschritts basierend auf datengesteuerten wissenschaftlichen Methoden. Die aktuelle Studie (InfluenceMap 2021) identifiziert eine Doppelstrategie, um Regulierungen von Klimaemissionen zu vermeiden. Die Branche hat auf europäischer Ebene eine hochrangige Unterstützung für die Netto-Null-Emissionen des EU-Luftverkehrs bis 2050 kommuniziert (https://www.destination2050.eu) und sich gleichzeitig im direkten Engagement mit politischen Entscheidungsträgern gegen spezifische nationale und EU-Klimavorschriften ausgesprochen. Auf globaler Ebene soll über die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) erreicht werden, dass CORSIA Vorrang vor Maßnahmen zur absoluten Reduzierung der Luftverkehrsemissionen hat. Ziel ist dabei, die Ambitionen des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) für die Luftfahrt zu untergraben (Bild 4).

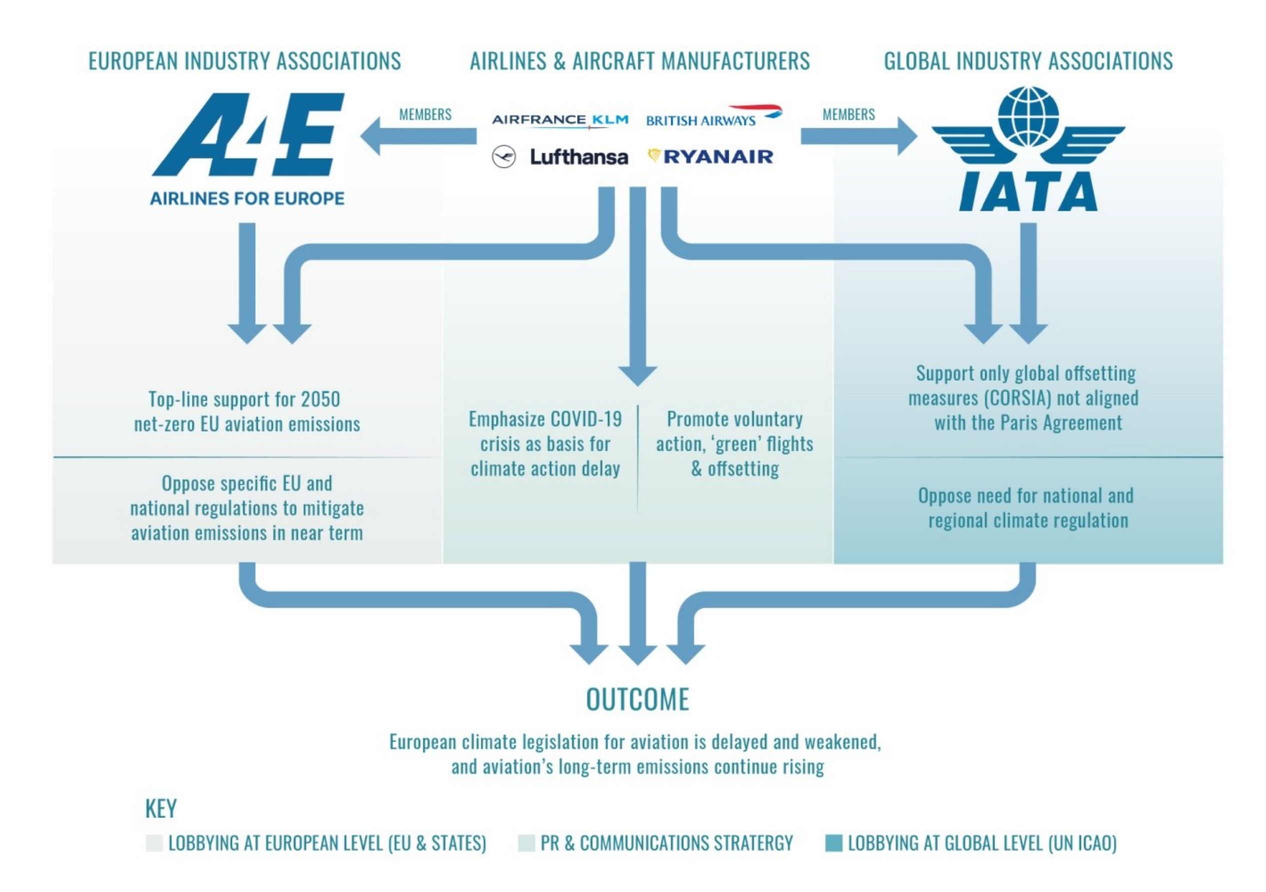


Bild 4: Die klimapolitische Strategie der Luftfahrtbranche (InfluenceMap 2021).

Auch die Aussage von **John S. Slattery**, Präsident des Triebwerksherstellers General Electric könnte so verstanden werden, dass "Zero Emission" kein echtes Ziel ist. In Flight 2021a wird er zitiert mit seiner Aussage zum "nirvana of zero-carbon flight" (**Nirvana des CO2-freien Fliegens**). "Zero Emission" wäre dann eher ein Glaubensbekenntnis. Wie "Nirvana" genau auf die Luftfahrt angewandt werden soll bleibt unklar.

Welche Klimaziele hat die EU für die Luftfahrt?

Nach dem "**Green Deal**" der EU von 2019 sollen "**im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden**". "Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen die verkehrsbedingten Emissionen bis 2050 um 90 % gesenkt werden." Das bedeutet, dass die restlichen 10 % der Emissionen kompensiert werden dürfen. "Alle Verkehrsträger (Straße, Schiene, Luft- und Schifffahrt) werden zu dieser Verringerung beitragen müssen." Den Luftfahrtunternehmen sollen im Rahmen des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) weniger Zertifikate kostenlos zugeteilt werden. Dies soll mit den Maßnahmen der ICAO durch CORSIA abgestimmt werden. Es soll "die **Luftqualität in der Nähe von Flughäfen** verbessert werden, indem die Schadstoffemissionen von Flugzeugen und im Flughafenbetrieb bekämpft werden." (EU 2019b)

Im Jahr 2020 wurde das Klimaziel Europas bis 2030 definiert. **Als Zwischenziel zum Green Deal sollen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um 55 % reduziert werden** – also nur noch 45 % des Wertes von 1990 betragen. Dieser Wert soll bis 2030 erreicht werden (EU 2020a). Unter dem Motto **"Fit for 55"** hat die EU Kommission auch ihre Vorschläge für die Luftfahrt unterbreitet (EU 2021b):

1. Die **kostenlosen Emissionszertifikate** für den Luftverkehr im EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) **werden schrittweise abgeschafft** (EU 2021c). Für innereuropäische Flüge werden die Zertifikate jedes Jahr um 4,2 % reduziert. Für Flüge außerhalb der EU gilt CORSIA (EU 2021d). Alle Länder Europas werden ab 2021 freiwillig teilnehmen (EU 2021e).
2. Eine **Steuer auf Kerosin** wird ab dem 1.1.2023 schrittweise eingeführt, bevor nach einer Übergangsfrist von zehn Jahren der endgültige Mindestsatz von 10,75 EUR/GJ erreicht wird (EU 2021f, EU 2021g).
3. Kraftstoffanbieter müssen dem in der EU angebotenen Turbinenkraftstoff schrittweise **nachhaltige Flugkraftstoffe** (Sustainable Aviation Fuel, SAF) **beimischen** (Bild 5), einschließlich sogenannter E-Fuels (EU 2021h). Details zu E-Fuels siehe unten. Die Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) soll überwachen und berichten (EASA 2021).
4. Flugzeuge müssen an Flughäfen Zugang zu sauberem Strom erhalten (EU 2021b).

Die Summe der Emissionen sind in der EU bereits rückläufig mit etwa 1 % pro Jahr. Von den 55 % sind damit also im Mittel bereits 30 %-Punkte geschafft. Anders aber im Bereich der Luftfahrt, wo die Emissionen seit 1990 durch die Zunahme des Luftverkehrs gewachsen sind (Bild 6). Die 55 % Reduktion im Vergleich zu 1990 bedeutet für die Luftfahrt daher jetzt eine Reduktion von mehr als 80 % bis 2030 also um etwa 9 % pro Jahr. Der Kraftstoffverbrauch konnte bisher jährlich um 1,5 % gesenkt werden durch operative Maßnahmen und Technologie. **Der Luftverkehr müsste** daher **jetzt um 7,5 % pro Jahr dauerhaft schrumpfen** (unabhängig

vom kurzen Einfluss der Pandemie). Mit Blick auf das gesellschaftliche und politische Umfeld wird das wohl nicht passieren.

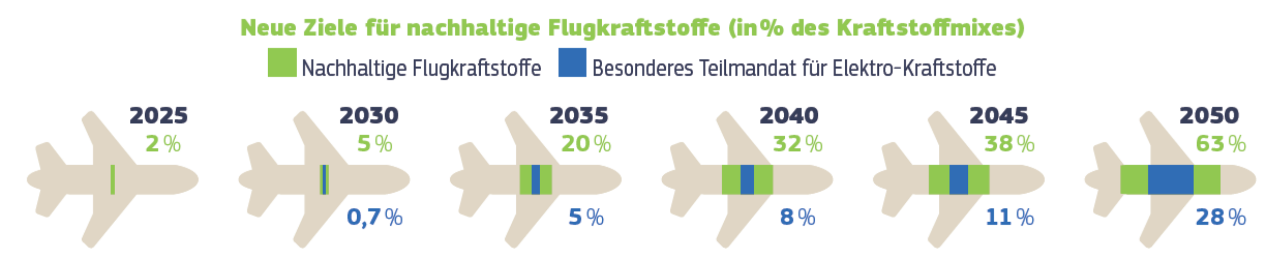


Bild 5: Nachhaltige Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels, SAF) sollen dem konventionellen Kerosin schrittweise in höheren Anteilen beigemischt werden (EU 2021d).

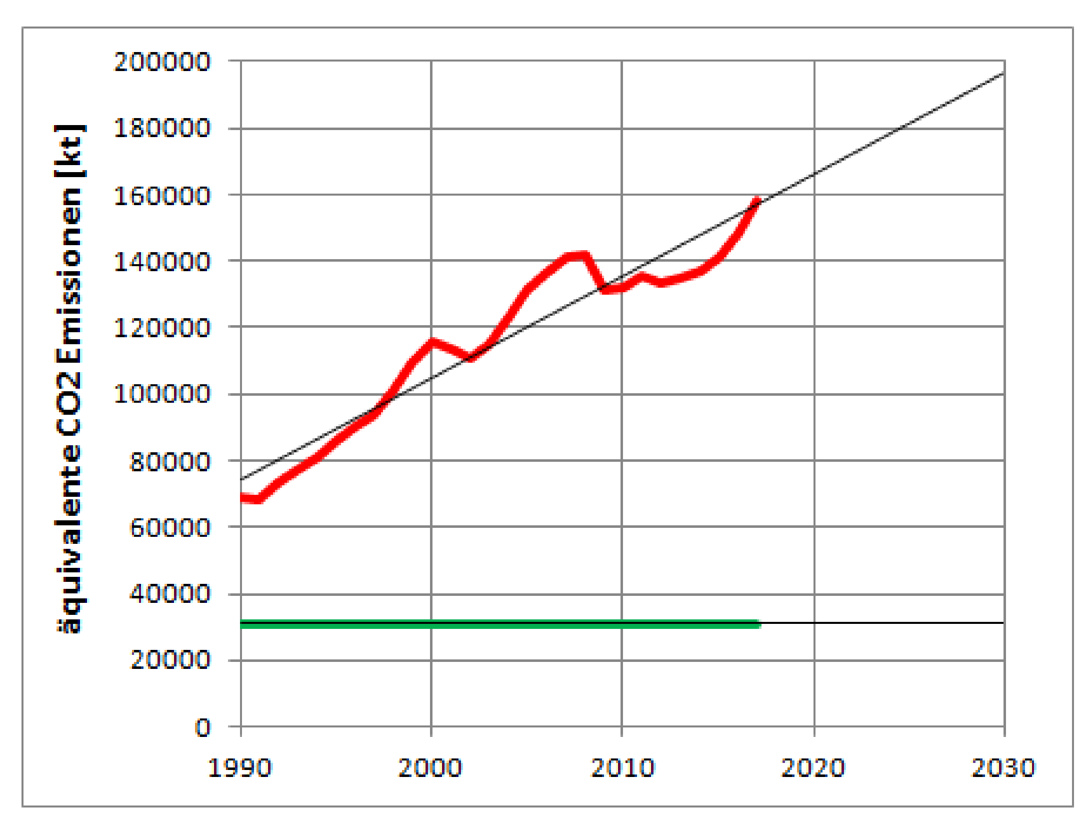


Bild 6: Die äquivalenten CO2 Emissionen (in 1000 Tonnen oder kt) der internationalen Luftfahrt in der EU steigen kontinuierlich (rote Linie), dabei sollen die Emissionen eigentlich nach dem "Green Deal" der EU gesenkt werden (bis 2030) auf 45 % des Wertes von 1990 (grüne Linie). Diagramm erstellt mit Daten von EEA 2019 (Scholz 2021b).

Die Vorschläge unter **"Fit for 55"** der EU-Kommission müssen jetzt noch konkret in Direktiven umgesetzt werden. Bild 7 zeigt das gesamte Paket der Maßnahmen. Die **ReFuelEU-Aviation-Initiative** (EU 2020b, EU 2021g) adressiert die Luftfahrt direkt. Es geht dabei um den Einsatz von nachhaltigen Kraftstoffen (Sustainable Aviation Fuel, SAF). Weiter von Bedeutung sind auch die **Energy Taxation Directive (ETD)** (EU 2021f) und die **Renewable Energy Directive (RED II)** (EU 2019c). Das Regelwerk ist kompliziert.

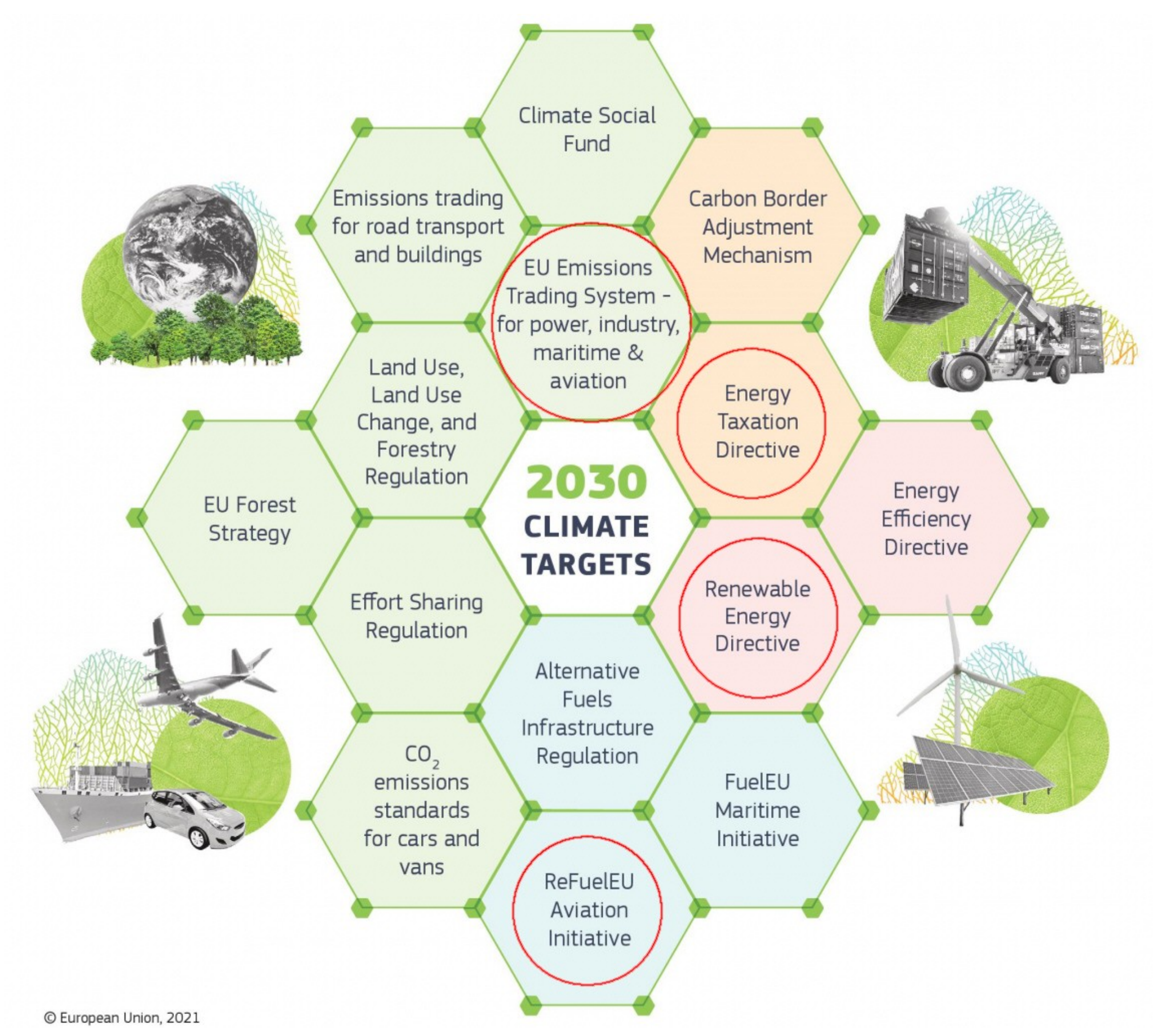


Bild 7: Das Paket für die Klimaziele bis 2030 ("Fit for 55"). Rot gekennzeichnet sind die Direktiven und Initiativen, die besondere Bedeutung für die Luftfahrt haben (EU 2021i, CC BY).

Wie kommen wir vom Erdöl zu den neuen Energieträgern der Luftfahrt?

Fossile Energie (Erdöl) ist so praktisch, weil es aus der Erde entnommen wird und nach einer vergleichsweise leichten Bearbeitung in der Raffinerie als **Kerosin** im Passagierflugzeug genutz werden kann. Kerosin hat in der Masse von einem kg sehr viel Energie gespeichert (43 MJ) und benötigt dafür wenig Volumen wegen einer hohen Dichte (800 kg/m³). Man sagt: "Kerosin ist so gut zum Fliegen geeignet – wäre es uns nicht von der Natur gegeben worden, es hätte erfunden werden müssen."

Wenn Flugzeuge ohne fossile Energien auskommen sollen oder müssen, dann muss Energie auf andere Weise bereit gestellt werden und in passender Form an Bord gebracht werden. In

Deutschland besteht unterdessen weitgehend Konsens, dass als **Energielieferant für die Luftfahrt** nur regenerative Energien infrage kommen. Es geht also um Strom aus Wind, Biomasse, Sonne und Wasserkraft. In Deutschland scheidet die Atomenergie als Energielieferant für die Luftfahrt aus. Der Stoff in dem der Ökostrom an Bord gespeichert wird ist der **Energieträger für die Luftfahrt**. Batterien könnten den Ökostrom direkt aufnehmen. Wasserstoff oder synthetisches Kerosin müssten mit Hilfe von Ökostrom erst erzeugt werden (siehe unten).

Über die Jahre gab es schon viele Vorschläge, wie die Luftfahrt ohne fossile Kraftstoffe auskommen und klimaschonender werden könnte. Nicht selten, dass solche Vorschläge einige Zeit auch in den Medien bewegt werden. Dann wird es aber still und man hört nichts mehr. So z. B. bei den Algen. Die **Luftfahrt sollte mit Kraftstoff aus Algen betrieben werden** (Reddy 2015). Algenkraftstoff ist eine Variante der Biokraftstoffe. Da neben der Agrarfläche auch die Frischwasservorräte auf der Welt begrenzt sind, sollten die Algen im Ozean wachsen und dann zu Kerosin verarbeitet werden (NASA 2012). Das Thema hat sich erledigt (Wesoff 2017). Der Prozess benötigt zu viel Energie.

Erneuerbarer Strom sollte in Batterien gespeichert werden. **Passagierflugzeuge sollten** so **batterie-elektrisch betrieben werden**. Airbus wollte dazu ein Triebwerk eines vierstrahligen Passagierflugzeuges vom Typ BAe 146 versuchsweise auf Elektroantrieb umrüsten (Airbus 2018). Das Projekt wurde 2020 aufgegeben (Airbus 2020a). Batterien sich für den Flugbetrieb zu schwer und ausreichend leichte Batterien sind nicht in Sicht (Scholz 2018). **Hybrid-elektrisch betriebene Passagierflugzeuge** werden diskutiert. Sie nutzen eine von vielen möglichen Kombinationen zwischen herkömmlicher und elektrischer Technik, bieten aber auch keine Vorteile. Durch die komplizierte Antriebstechnik steigen die Kosten und das Gewicht. Letztlich stellen sich kaum Vorteile beim Kraftstoffverbrauch oder den Emissionen ein. Diese Erkenntnis hat sich aber noch nicht herumgesprochen, so dass weiter mit öffentlichem Geld geforscht wird.

Aktuell werden **zwei Vorschläge zum Energieträger** diskutiert:

1.) Wasser soll mittels Ökostrom und Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt werden. Der **Wasserstoff** soll dann bei ca. -250 °C flüssig als Liquid Hydrogen (LH2) in speziellen Tanks im Flugzeug transportiert werden. LH2 kann dann in nur leicht modifizierten Strahltriebwerken genutzt werden. In der UdSSR wurde das Prinzip schon 1988 erfolgreich mit einer TU-155 gezeigt. Trotzdem müssten erst neue Flugzeuge gebaut werden und die Infrastruktur an den Flughäfen verfügbar gemacht werden. Airbus wollte zunächst bis 2035 ein mit LH2 betriebenes Flugzeug am Markt anbieten (Airbus 2020b, Flight 2021b). **Airbus hat aber gegenüber der EU vertraulich erklärt, dass ein LH2-Mittelstreckenflugzeug (100 bis 250 Sitze) nicht vor 2050 zum Einsatz kommen wird** (Airbus 2021, Seite 14). Selbst danach wird es nicht sofort gelingen den Markt zu durchdringen, weil Flugzeug gewöhnlich 30 Jahre im

Einsatz sind. Weiterhin **ist der Einfluss auf das Klima bei Wasserstoffflugzeugen aufgrund der Nicht-CO2-Effekte ähnlich wie bei kerosinbetriebenen Flugzeugen** (Scholz 2020b). Durch Umwandlungsverluste bei der Elektrolyse und der Wasserstoffverflüssigung ist die benötigte Ökostrommenge 1,7-mal so hoch wie die Energie im erzeugten Wasserstoff (EU 2020c). **Unter Berücksichtigung des Strommix** (siehe unten) **ist die Klimawirkung von Wasserstoffflugzeugen höher** als bisher bei Kerosinflugzeugen.

2.) Um eine Lösung für existierende Flugzeuge anzubieten, soll synthetisches Kerosin (**E-Fuel**) aus Strom, Wasser und CO2 hergestellt werden. E-Fuels sind neben den Biokraftstoffen (z. B. aus Algen, siehe oben) eine Variante der Sustainable Aviation Fuels (SAF) (EPRS 2020). Mit Elektrolyse wird aus Wasser zunächst Wasserstoff gewonnen. CO2 wird mittels Direct Air Capture (DAC) aus der Luft entnommen. Zum Kraftstoff verbunden werden die Komponenten mit dem schon 1925 in Deutschland entwickelte Fischer-Tropsch-Verfahren. Es ergibt sich ein Kohlenstoffkreislauf (Carbon Cycle), weil das CO2 mit DAC der Luft wieder entnommen wird. Die Einzelheiten zeigt Bild 8. Weil das synthetische Kerosin dem herkömmlichen weitgehend entspricht, **haben Flugzeuge, die mit E-Fuels fliegen aufgrund der Nicht-CO2-Effekte immer noch ca. 2/3 der Klimawirkung**. Wenn die Verluste bei der Kraftstoffherstellung und beim DAC berücksichtigt werden sind die Emissionen höher (siehe unten).

Über die **Umwandlungsverluste bei der Erstellung der E-Fuels** werden stark abweichende Angaben gemacht. Nach dem meisten Angaben ist die benötigte Ökostrommenge 2 bis 4,5-mal so hoch wie die Energie im erzeugten synthetischen Kerosin (EU 2020c, ÖkoInstitut 2013, König 2016, Ueckerdt 2021). Die Firma Sunfire (https://www.sunfire.de) will einen Wirkungsgrad von 84 % erreichen und damit nur die 1,2-fache Menge an Ökostrom verbrauchen. Liegt zur Herstellung des E-Fuels kein Ökostrom vor, sondern nur ein Strommix, dann müsste auch noch das CO2 aus dem Strommix (siehe unten) mit DAC wieder aus der Luft geholt werden und per CO2-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Dioxide Capture and Storage, CSS) kompensiert werden.

Der **Aufwand für die Abscheidung von CO2 aus der Luft** (Direct Air Capture, DAC) ist erheblich, weil die Luft nur aus 0,04 % CO2 besteht. Es werden für die Abscheidung mindestens 1,8 MJ Energie benötigt pro kg CO2 (Smith 2015). In der Praxis sind das aber eher 7,2 MJ/kg (Brandani 2012). Die Anlage der Firma Climeworks (https://www.climeworks.com) in der Schweiz benötigt 12 MJ/kg (CarbonBrief 2017). Es fallen 3,15 kg CO2 an bei der Verbrennung von 1 kg Kerosin. Beim Energieinhalt des Kerosins von 43 MJ wird also für DAC noch einmal mindestens die 4 % der Energie des synthetischen Kerosins benötigt, eher noch einmal 17 % dazu, oder sogar 28 % zusätzlich.

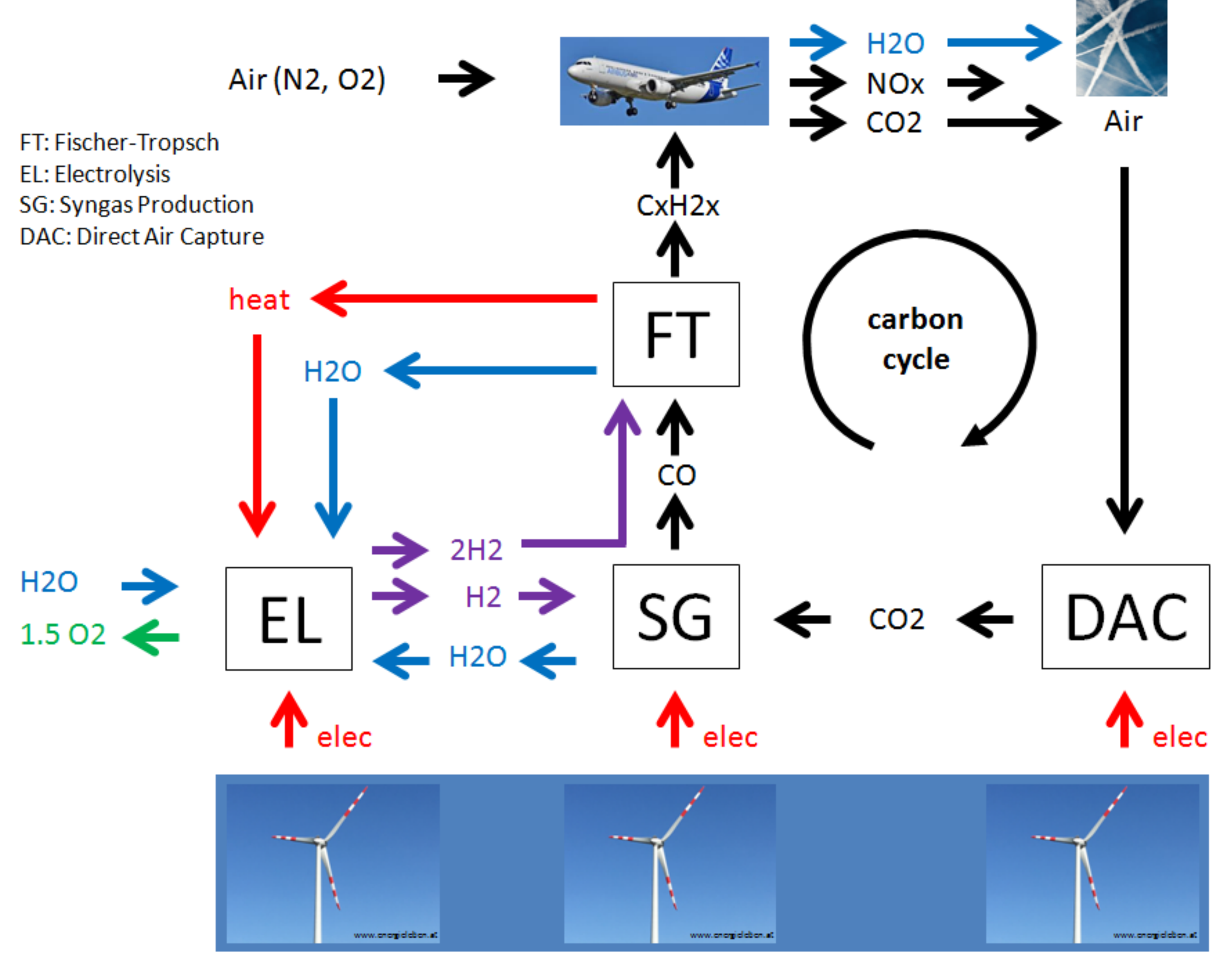


Bild 8: Herstellung von synthetischem Kerosin (E-Fuel) mit Power-to-Liquid (PtL). Durch die Entnahme von CO2 aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) wird ein Kohlenstoffkreislauf (Carbon Cycle) ermöglicht. Gleichungen siehe Verdegaal 2015.

Für die Herstellung von LH2 oder von E-Fuels kann man sich nicht den sauberen Strom aus dem Netz heraussuchen und den dreckigen Strom anderen überlassen. **Es muss der Strommix betrachtet werden**. Derzeit hat der Strommix in Deutschland einen Anteil von 44,5 % an fossilen Energien (Bild 9). Wenn für den ganzen Vorgang der E-Fuel-Herstellung einschließlich DAC (Bild 8) mehr als die 2,2-fache Ökostrommenge benötigt wird, dann kommt es zu keiner CO2-Einsparung. Nach den Zahlen der letzten beiden Absätze wird deutlich: **heute kann mit den E-Fuels kein CO2 eingespart werden. Damit ist dann auch die Klimawirkung von Flugzeugen mit E-Fuels nicht besser als bisher – möglicherweise aber schlechter**. Eine lineare Hochrechnung lässt vermuten, dass der Anteil fossiler Energien im Jahr 2050 auf 20 % abgefallen sein könnte (Scholz 2021c). Wenn E-Fuels im Jahr 2050 hergestellt werden, dann wäre es evtl. möglich damit CO2-Emissionen einzusparen. "Zero Emission" wäre dann aber selbst im Jahr 2050 noch nicht zu erreichen.

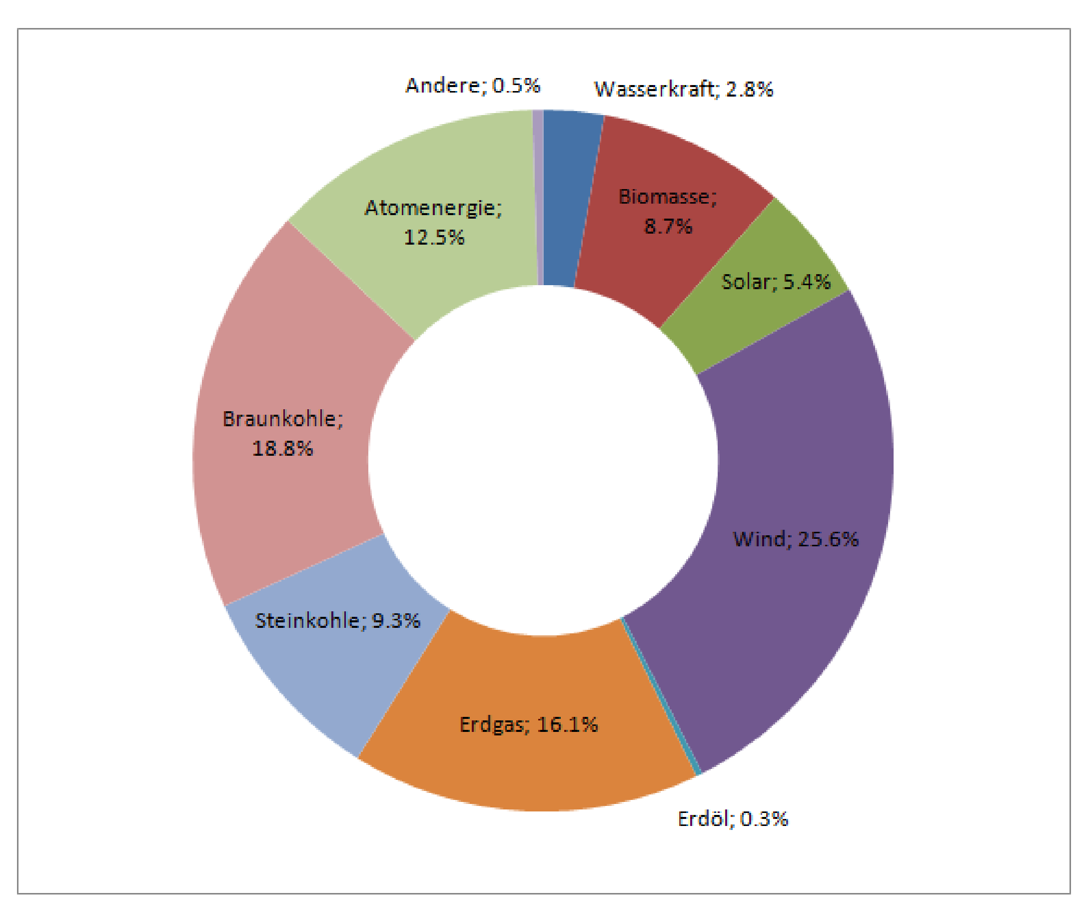


Bild 9: Strommix in Deutschland, 1. Quartal 2021. Erstellt nach Daten von: Fraunhofer, Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer 2021). Erneuerbare Energien: 42,5 %. Fossile Energien: 44,5 %.

Der Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) schreibt: "Nur mit Kraftstoffen auf Basis von zusätzlichen regenerativen Energien kann Fliegen mittel- bis langfristig klimafreundlich gestaltet werden. Dabei spielt insbesondere strombasiertes Kerosin (Power-to-Liquid = PtL) eine zentrale Rolle. Bei diesen Kraftstoffen wird das CO2, das beim Fliegen emittiert wird, zuvor aus der Atmosphäre entnommen" (BDL 2021a). Wenn also zusätzlicher regenerativer Strom genutzt wird, dann würde eine Betrachtung des Strommix entfallen. Der zusätzliche regenerative Strom könnte aber nicht aus Deutschland kommen, weil deutscher Ökostrom schon für den Atomausstieg und den Ausstieg aus der Kohleverstromung gebraucht wird (siehe unten) und dafür noch weiter ausgebaut werden muss. **Die Luftfahrt müsste** daher **eigene regenerative Energiequellen finden** (BMU 2021). Zertifizierter Ökostrom aus der Wüste wäre eine Möglichkeit. Norwegischer Strom aus Wasserkraft wird die Weltluftfahrt nicht versorgen können, denn der Strom wird auch heute in Norwegen bereits genutzt.

Für die Versorgung der Luftfahrt wären unvorstellbar große Mengen an Ökostrom erforderlich. Für die täglich einmalige Betankung eines Airbus A350 müssten 52 der größten existierenden Windräder (4,6 MW, 250 m hoch) eingeplant werden. Direct Air Capture (DAC) müsste organisiert werden, steckt aber noch am Anfang der Entwicklung (https://www.climeworks.com). Die Energie für DAC ist bei den 52 Windrädern noch nicht

eingerechnet. **Die DAC-Anlage für jedes Flugzeug hätte eine Grundfläche deutlich größer als die des Flugzeugs selbst** gebildet aus seiner Länge und Spannweite (errechnet nach Daten von Sapea 2018).

Zusammenfassend kann **zu den zwei Energieträgern** Wasserstoff (LH2) und synthetisches Kerosin (E-Fuel) gesagt werden, dass sie es ermöglichen, weiterhin zu fliegen, wenn die fossilen Kraftstoffe ausgehen (oder durch geringe Verfügbarkeit die Kraftstoffpreise in die Höhe getrieben wurden). Durch die Umwandlungsverluste (insbesondere bei den E-Fuels) wird aber viel Ökostrom benötigt, was sich bei den Energiekosten bemerkbar machen wird. **LH2** hat für das Klima den Vorteil, dass sich **direkt keine CO2-Altlasten** mehr ansammeln (außer über den Strommix). Die **Klimawirkung der Luftfahrt mit LH2 bleibt** aber durch die Nicht-CO2-Effekte **unverändert**. Das Gleiche könnte für die E-Fuels gesagt werden, wenn ein Strommix ohne fossile Energie vorliegen würde. Das ist aber nicht der Fall. Daher **bringen E-Fuels für das Klima vorerst keine Vorteile**.

Können Kraftstoffverbrauch und Emissionen reduzieren werden?

Der **Kraftstoffverbrauch pro Kopf und Kilometer** konnte jedes Jahr um 1,5 % gesenkt werden. Das geht nur zum Teil auf den technischen Fortschritt zurück. Der Rest wurde dadurch erreicht, dass die Flugzeuge ein Kabinenlayout bekommen haben, dass mehr Passagiere unterbringt und dadurch, dass die Auslastung der Flugzeuge erhöht werden konnte. Von 1968 bis 2018 konnte die Auslastung von 52,5 % auf 84 % erhöht werden. Das ist eine Steigerung von etwa 1 % pro Jahr (TransportGeography 2018).

Schauen wir auf ein konkretes Beispiel der **Absenkung des Kraftstoffverbrauchs durch den Einsatz von Technologie**. In der Zeit von 1988 bis 2016 ist aus dem Airbus A320 der Airbus A320neo geworden. Der Kraftstoffverbrauch konnte durch den Einsatz von neuen Triebwerken und durch Flügel mit nach oben gezogenen Enden (Winglets) abgesenkt werden. Gemäß Herstellerangaben ist der Kraftstoffverbrauch bei der A320neo gegenüber dem Vorgängermodell um 15 % geringer. Das sind in diesem Fall 0,5 % Kraftstoffeinsparung pro Jahr, die technologisch in der Zeit zwischen 1988 und 2016, also in 28 Jahren erreicht wurden.

Flugzeuge sind technisch schon sehr weit entwickelt. **Es wird** dadurch **immer schwieriger den Kraftstoffverbrauch der Passagierflugzeuge noch weiter zu reduzieren**. Hinzu kommt, dass im Flugzeug auch immer auf das Gewicht geachtet werden muss. Eine Veränderung am Flugzeug, die den Wirkungsgrad erhöht, aber das Flugzeug schwerer macht, muss am Ende keinen Vorteil im Verbrauch bringen. Prozesse, die am Boden stattfinden haben Vorteile, weil nicht auf das Gewicht der Komponenten geachtet werden muss. Daher kommt die alte Aussage: "Der letzte Tropfen Kraftstoff wird in das Flugzeug gehen", Antriebsalternativen wird man woanders suchen müssen. Der **Handel mit Emissionszertifikaten** will diese Abwägung auf eine

wirtschaftliche Grundlage stellen. Emissionen sollen dort reduziert werden, wo es wirtschaftlich von Vorteil ist.

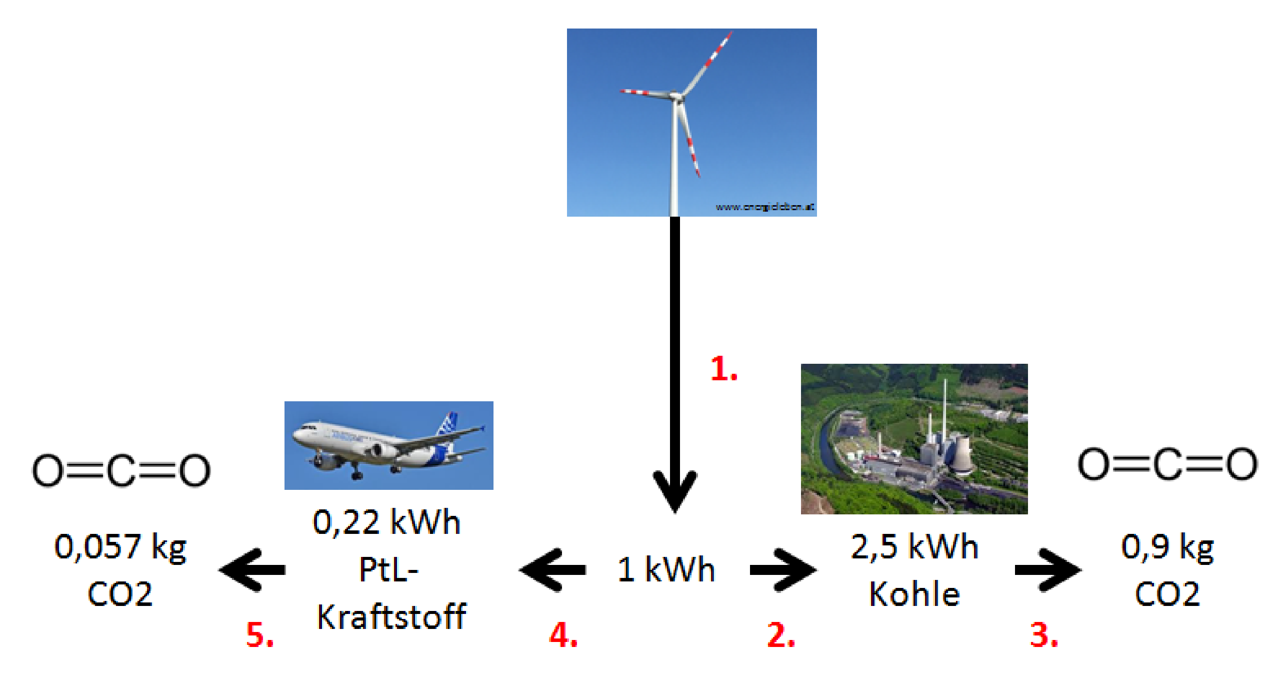


Bild 10: 1.) 1 kWh erneuerbarer Energie ...
2.) ... kann 2,5 kWh Braunkohle im Kohlekraftwerk ersetzen (Wirkungsgrad 40 %);
3.) das entspricht 0,9 kg CO2 (0,36 kg CO2 für 1 kWh Energy durch Braunkohle*).
4.) ... umgewandelt in Sustainable Aviation Fuel (SAF) bleiben davon nur 0.22 kWh (Wirkungsgrade: 70 % Elektrolyse, 32 % Fischer-Tropsch, EU 2020, S. 44),
5.) die nur 0.057 kg CO2 einsparen (0.26 kg CO2 für 1 kWh of Kerosin*).

* UBA, 2016: CO2 Emission Factors for Fossil Fuels. https://bit.ly/3r8avD1

Aufgrund der Wirkungsgradketten ist es z. B. viel hilfreicher, mit regenerativer Energie Kohlekraftwerke zu ersetzen, als Kerosin in Flugzeugen. Bild 10 zeigt dazu eine CO2-Vermeidung je kWh erneuerbarer Energie von 0,9 kg im Kohlekraftwerk gegenüber nur 0,057 kg im Flugzeug. **Die Nutzung der regenerativen Energie im Kraftwerk vermeidet 15-mal mehr CO2** (bei den angenommenen Wirkungsgraden).

Wie hoch sind Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Passagierflugzeugen?

Der **Kraftstoffverbrauch von Passagierflugzeugen** ist nicht definiert und nicht öffentlich angegeben und **entzieht sich** damit dann auch **einer öffentlichen Diskussion**. Es ist aber möglich, den Kraftstoffverbrauch aus den öffentlich verfügbaren Herstellerangaben zu errechnen. Für diejenigen, die sich weiter mit dem Thema beschäftigen möchten, hier eine einfache Abschätzung. Es werden vier Zahlen benötigt, die i.d.R. zu finden sind und nicht der Geheimhaltung unterliegen: die maximale Abflugmassen (MTOW), die Masse des voll

beladenen Flugzeugs ohne Kraftstoff (MZFW), die maximale Reichweite (R) bei voller Beladung (also bei MZFW) und die Anzahl der Sitzplätze (SP). Damit ist dann

$$\text{Verbrauch} = (\text{MTOW} - \text{MZFW}) / (\text{R} \cdot \text{SP}) \cdot 100$$

Beispiel Airbus A320neo:
2,2 kg pro 100 km und Sitz = (73500 kg – 62800 kg) / (3180 km · 150) · 100

Der so einfach errechnete Verbrauch fällt etwas zu hoch aus. Multipliziert mit der Entfernung (Luftlinie) zwischen zwei Orten kommt aber ein ganz passender Kraftstoffverbrauch für die Flugstrecke heraus. Der Vergleich zwischen zwei Flugzeugen ist ebenfalls gut möglich.

Eine genauere Berechnung (Scholz 2021a) zeigt Bild 11a/11b. Es fällt auf, dass **der Kraftstoffverbrauch von Passagierflugzeugen** stark von der Flugstrecke abhängt. Über einen weiten Einsatzbereich (bei mittlerer Flugstrecke) ist der Kraftstoffverbrauch vergleichsweise konstant. **Der Kraftstoffverbrauch pro Sitzplatz steigt stark an, wenn sehr kurze oder für das Flugzeug sehr lange Strecken geflogen werden**. Extreme Reichweiten kann ein Flugzeug nur schaffen, wenn es mit reduzierter Nutzlast (mit weniger Passagieren) und damit leichter betrieben wird. Dadurch steigt der Verbrauch pro Person. Kraftstoff wird verbraucht für Start und Landung sowie für den Höhengewinn beim Steigen, der beim Sinken nicht vollständig genutzt werden kann. Das führt auf kurzen Strecken zum Anstieg des Verbrauchs pro Kilometer. Im Beispiel (Bild 11a) ist der Verbrauch bei 500 km doppelt so hoch wie der minimale Verbrauch des Flugzeugs. **Passagierflugzeuge sind also allein aufgrund der Flugphysik für die extreme Kurzstrecke nicht geeignet.**

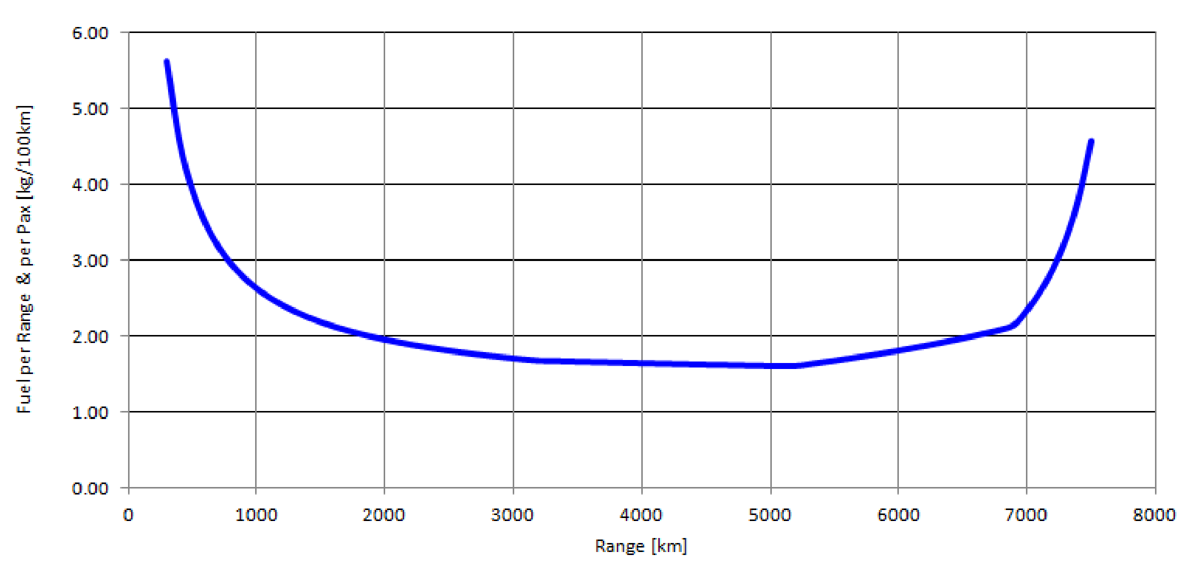


Bild 11a: Der Kraftstoffverbrauch eines modernen Kurz- Mittelstreckenflugzeugs am Beispiel des Airbus A320neo abhängig von der Flugstrecke in kg pro Sitzplatz und 100 km.

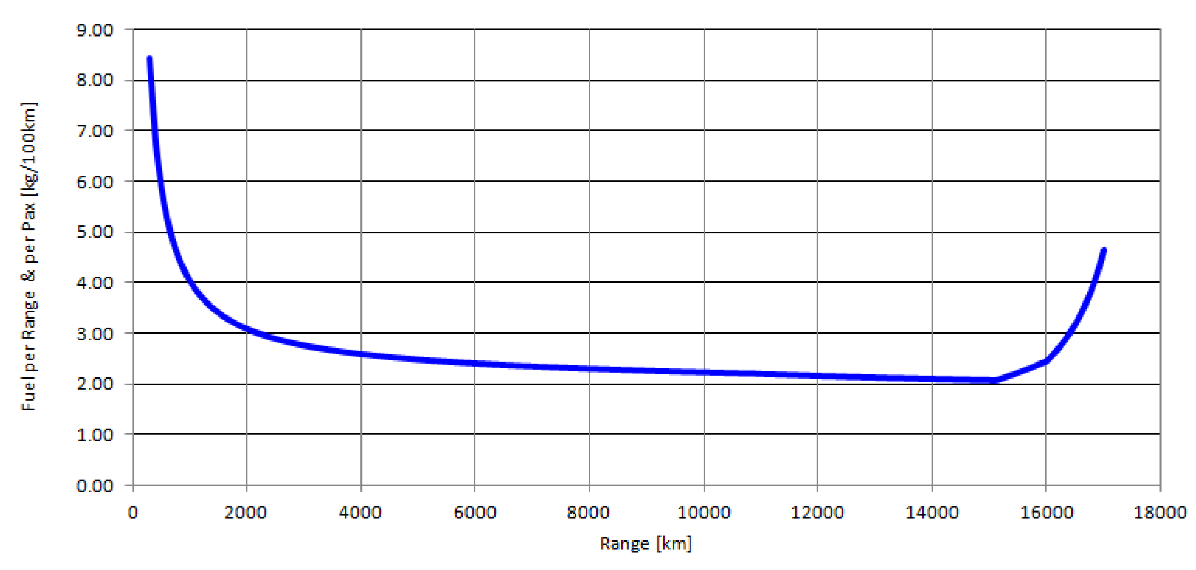


Bild 11b: Der Kraftstoffverbrauch eines modernen Langstreckenflugzeugs am Beispiel des Airbus A350-900 abhängig von der Flugstrecke in kg pro Sitzplatz und 100 km.

Für einen **Vergleich mit dem PKW** könnte man für das Flugzeug von typischen 3 kg pro Sitzplatz und 100 km ausgehen (BDL 2013). Wir gehen hier aber von dem geringeren Verbrauch eines modernen Kurz- Mittelstreckenflugzeugs aus. Nach Bild 11a sind das 1,7 kg pro Sitzplatz und 100 km, wenn das Flugzeug in seinem optimalen Flugstreckenbereich betrieben wird. Mit der Dichte von Kerosin sind das etwa 2,1 Liter pro Sitzplatz und 100 km, aber 2,7 Liter pro Person und 100 km, wenn das Flugzeug nur zu 80 % belegt ist. **Ein voll besetzter PKW verbraucht deutlich weniger pro Person als ein voll besetztes Flugzeug**. Wenn man im PKW jedoch allein unterwegs ist, dann wäre das Flugzeug günstiger hinsichtlich des Energieverbrauchs. Beim Flugzeug müssen aber bei den Emissionen die Nicht-CO2-Effekte (siehe unten) mit einem Faktor von 3 berücksichtigt werden. **Für das Klima wäre** dann **der PKW besser, selbst wenn dieser nur von einer Person genutzt wird**.

Das kostbare Gut in der Flugzeugkabine ist die Kabinenfläche. Genau genommen müsste also der **Verbrauch pro Quadratmeter Kabinenfläche** berechnet werden. Wer dann in der ersten Klasse fliegt in breitem Sitz und viel Beinfreiheit, der nutzt mehr Kabinenfläche und auf den entfällt auch ein höherer Verbrauch als auf die Person, die sich in die Touristenklasse gezwängt hat.

Die Luftverkehrsgesellschaften fliegen im Prinzip die gleichen wenigen Flugzeugtypen, die am Markt verfügbar sind. Der Verbrauch pro Person lässt sich also nur reduzieren durch Erhöhung der Anzahl der Passagiere im Flugzeug. Das wird durch enge Bestuhlung erreicht und durch eine hohe Auslastung. Low Cost Airlines sind bekannt für enge Bestuhlung und hohe Auslastung. **Günstige Ticketpreise gehen in der Praxis** also **einher mit geringem Verbrauch pro Kopf und Kilometer** und geringer Umweltwirkung. Keiner will Fliegen verbieten oder gar Geringverdienern mit vielen Kindern den Flugurlaub unmöglich machen. **Daher sollten**

staatliche Eingriffe in die Ticketpreise am unteren Ende der Skala unterbleiben. Wenn trotz des ansonsten beschworenen freien Marktes doch in die Preisstruktur der Flugtickets eingegriffen werden soll, dann dort, wo hohe Verbräuche pro Kopf anfallen und das wäre dort, wo pro Sitzplatz viel Kabinenfläche verbraucht wird. Es könnten also zusätzliche Abgaben auf Tickets der ersten Klasse erhoben werden. Das könnte dazu führen, dass die Nachfrage sinkt, diese Klasse verkleinert wird, mehr Passagiere in ein Flugzeug passen und so weniger Flugzeuge fliegen müssen und so die Emissionen sinken.

Das CO2 verteilt sich über sehr lange Zeiten gleichmäßig in der Atmosphäre. **Die Nicht-CO2-Effekte** (durch NOX und AIC) ergeben sich zusätzlich abhängig von der Flughöhe. Ihre Wirkung ist zeitlich begrenzt, aber dafür intensiv. Da gibt es die wärmende Wirkung der **Stickoxide** (NOX) auf die komplizierte Chemie der Atmosphäre. Weiter gibt es die insgesamt wärmende Wirkung der Kondensstreifen und der Zirren, die sich aus den Kondensstreifen bilden können. Man spricht von **Aviation-Induced Cloudiness** (AIC). AIC wirkt unterschiedlich am Tag und in der Nacht, im Sommer und im Winter, am Äquator und am Pol.

Die **Wirkung der Nicht-CO2-Effekte der Luftfahrt** ist etwa doppelt so groß, wie die Wirkungs des CO2 allein. **Der Gesamteffekt ist** also etwa **dreimal so groß**. Die Menge an äquivalenten CO2 beschreibt die Menge des CO2, das den gleichen Effekt auf das Klima hat, wie die Summe aus CO2- und Nicht-CO2-Effekten. Die **Menge des äquivalenten CO2** ist daher etwa dreimal so groß, wie die Menge des CO2. Der Faktor hängt von der Flughöhe ab. Der Faktor drei gilt für eine typische Reiseflughöhe.

> *Nach einer einfachen Abschätzung für ein Kurz-/Mittelstreckenflugzeug ergibt sich: Bei einer Flughöhe von 6500 m würde sich die Klimawirkung um 70 % reduzieren, während der Kraftstoffverbrauch gleichzeitig um 6 % und die Kosten um 0,6 % steigen würden.*
>
> https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:18302-aero2019-07-28.013

Zurück zur **Aviation-Induced Cloudiness**. Betrachten wir mittlere Breiten, so ist die Wirkung in ca. 10 km Höhe besonders hoch – etwa dort, wo die Passagierflugzeuge ihre Bahnen ziehen. **AIC kann** daher ganz vermieden oder **stark reduziert werden, wenn etwas tiefer (und langsamer) geflogen wird**. Das muss nur geschehen, wenn es die aktuellen Atmosphärenbedingungen erfordern. Der Kraftstoffverbrauch und damit die CO2-Emissionen würden leicht ansteigen. Etwas mehr Kraftstoff kostet etwas mehr. **Die Umweltwirkung des Luftverkehrs könnte** aber auf diese Weise **heute sofort erheblich vermindert werden**. Eine Abwägung hinsichtlich der AIC-Charakteristik und der leicht steigenden CO2-Emissionen muss mit Bedacht geschehen. Der beste Kompromiss kann über die Flughöhe gefunden werden. Grundsätzlich sind die Zusammenhänge bekannt. Leider verweigern sich die Airlines mit den Worten "hierzu bedarf es jedoch noch weiterer Forschungsarbeiten" (BDL 2021b). Das Verhalten ist nachvollziehbar, es geht hier nicht um Absichtserklärungen für das Jahr 2050, sondern um jetzt und heute. Aber es kostet Geld – wenn auch nur ganz wenig. Nicht jede Airline wird sich daher von dieser

Maßnahme überzeugen lassen. Selbst tragen wollen die Airlines die Kosten nicht. Dann müssten die Kosten an die Passagiere weiter geben werden. Im harten Wettbewerb würde die Airline im Nachteil sein, die die Maßnahme zur AIC-Minderung anwendet. So wird noch lange auf die letzten Ergebnisse der Forschung gewartet werden. **Eine Chance wird verpasst**.

Was ist besser für die Umwelt – Flugzeug oder Zug?

Beim Vergleich der Verkehrsträger ist der **Vergleich zwischen Flugzeug und Zug** Gegenstand der aktuellen Diskussion.

Es gibt **Verbindungen**, auf denen nur das Flugzeug ein Angebot machen kann (über Ozeane, Gebirge, Wüsten, ...). Dort wo beide, das Flugzeug und die Bahn, ein Angebot machen, muss abgewogen werden. Die Bahn scheidet oft schon aus, weil die Tickets zu teuer sind, oder grenzüberschreitend über das Internet keine Verbindung oder kein Preis ermittelt werden kann. Will man die längere Fahrzeit in der Bahn sinnvoll nutzen, dann könnte man über Nacht fahren. Das setzt aber entsprechende Angebote voraus. Nachtverbindungen fehlen oft. Es gibt also insbesondere im internationalen Bahnverkehr noch erhebliches Verbesserungspotenzial.

Der Energieverbrauch eines Zuges ist auf Strecke gering. Energie für das Beschleunigen, die beim Bremsen nicht oder nur teilweise zurückgewonnen werden kann ist entscheidend. Wichtig wird daher der Abstand zwischen den Stationen und die Geschwindigkeit, die dazwischen erreicht werden soll. Im Tunnel steigt der Verbrauch stark an. Der Verbrauch der Bahn kann damit eigentlich nur für einen Zug zusammen mit der befahrenen Strecke angegeben werden. Trotz dieser prinzipiellen Schwierigkeiten soll hier ein mittlerer Verbrauch von 60 Wh pro Sitzplatz und km angenommen werden (Fraunhofer 2020, Figure 4.2). Unberücksichtigt bleibt beim Vergleich, dass Reisende im Zug mehr Platz haben. Ein Vergleich mit dem Flugzeug wird erst möglich, wenn die für die elektrische Energie des Zuges aufgebrachte Primärenergie berechnet wird. Das ist die Energiemenge (z. B. an Diesel), die für die Erzeugung der elektrischen Energie im Kraftwerk erforderlich wird. Hier spielt der Strommix eine Rolle. Es ist demnach so: Für den Zug machen sich die Umwandlungsverluste im Kraftwerk negativ bemerkbar. Das Flugzeug kämpft mit diesen Umwandlungsverlusten im eigenen Triebwerk. Für das Flugzeug werden typische 3 kg pro Sitzplatz und 100 km angenommen (BDL 2013). **Der Energieverbrauch des Flugzeugs ist dann 2,8-mal so hoch wie der vom Zug**.

Als Nächstes werden die **CO2 Emissionen** verglichen. Wenn der Zug mit dem allgemeinen Strommix betrieben wird, so fährt dieser bereits heute mit einem geringeren fossilen Anteil und das Flugzeug hat somit 6,1-mal höhere CO2-Emissionen. Die äquivalenten CO2 in Reiseflughöhe sind beim Flugzeug das dreifache. In diesem Beispiel **hat das Flugzeug damit die 18,3-fache Umweltwirkung**. Wenn das Flugzeug dann den Vergleich noch auf extrem kurzen Strecken mit der Bahn antritt, dann ist der Verbrauch des Flugzeuges evtl. höher als 3 kg

pro Sitzplatz und 100 km (Bild 11) und der Vergleich würde für das Flugzeug noch ungünstiger ausfallen. Hilfreich wäre für das Flugzeug in diesem Fall, dass die normale Reiseflughöhe auf der Kurzstrecke nicht erreicht wird und sich der Faktor 3 zur Berechnung der äquivalenten CO2 etwas verringert.

Blicken wir in die Zukunft, dann fällt der Vergleich zwischen Flugzeug und Bahn für das Flugzeug immer schlechter aus. **Der Zug profitiert beim Strommix vom steigenden Ökostromanteil** (bei abnehmendem fossilen Anteil). Das Flugzeug fliegt hingegen unverändert mit Kerosin. Wenn das Flugzeug jedoch mit E-Fuel fliegt, dann verschlechtert sich der Vergleich für das Flugzeug mit Einführung der E-Fuels schlagartig aufgrund des schlechten Wirkungsgrades der E-Fuels durch die vielen Umwandlungen und den Energieverbrauch für die CO2-Abscheidung aus der Luft. Die absoluten Werte für das Flugzeug verbessern sich zwar mit der Zeit mit steigendem Ökostromanteil. Dies gilt jedoch für die Bahn genauso, sodass das schlechte Abschneiden des Flugzeugs gegenüber der Bahn zementiert ist und sich der Vergleich mit höherem Ökostromanteil auch nicht mehr verbessert. Das Flugzeug verbraucht dann über 20-mal mehr Energie als der Zug. Die Berechnungen zum Vergleich Flugzeug-Zug gibt es bei Scholz 2021c.

Weitere Kriterien zum Vergleich Flugzeug-Zug werden hier nur qualitativ angesprochen. Das Flugzeug benötigt für den Flug von A nach B nur die Infrastruktur in A und B also die Flughäfen. Ein Zug benötigt neben den Bahnhöfen auch die Infrastruktur für die Verbindung von A nach B. Die Abfertigungsgebäude eines Flughafens sind vergleichbar mit den Bahnhöfen. Hinzu kommen im Luftverkehrssystem die Flächen für die Start- und Landebahnen. Die Größe des dafür erforderlichen Geländes ist nicht unerheblich. Die **Reservierung von Flächen** für den Flug- oder Bahnverkehr ist **Gegenstand gesellschaftlicher Auseinandersetzungen**. Ein Beispiel sind die Auseinandersetzungen um die Startbahn West am Flughafen Frankfurt. Der Ausbau von Bahnstrecken ist ebenfalls umstritten. In beiden Fällen richtet sich der Protest gegen den **Verkehrslärm** und gegen den **Flächenverbrauch** mit entsprechend negativen Auswirkungen für die Natur. Bei Kurzstreckenflügen fallen anteilig viele Flughafen Quadratmeter auf wenige Kilometer Strecke. Bei Langstreckenflügen ist der Flächenverbrauch bezogen auf die Flugstrecke gering. Der Flächenverbrauch der Bahn ist proportional zur Streckenlänge und kann verringert werden, wenn die Trasse auf Stelzen steht. So sind in China viele Hochgeschwindigkeitsstrecken gebaut. Zusätzlicher Verkehrslärm der Bahn kann sich durch eine Streckenführung entlang der Autobahn in Grenzen halten. Das Flugzeug verursacht **lokale Luftbelastung** und Lärm nur am Flughafen. Die elektrifizierte Bahn verursacht lokale Luftbelastung am Kraftwerk abhängig vom fossilen Anteil am Strommix. Diese sind vergleichsweise gering. Eine Lärmbelastung tritt aber entlang der ganzen Bahnstrecke auf. Auf längerer Strecken verursacht die Bahn daher mehr Verkehrslärm als das Flugzeug (EEA 2020).

Ob es am Ende möglich wird Flugpassagiere zum Umstieg auf die Bahn zu motivieren, hängt vom Gesamtangebot ab. Wenn das Angebot der Bahn entsprechend attraktiv ausfällt, dann

könnten neben den Flugpassagieren auch noch weitere neue Bahnreisende gewonnen werden. Diese würden aber mit jedem zusätzlichen Passagierkilometer zusätzliche Emissionen verursachen. Wenn Effizienzsteigerungen dazu führen, dass die Passagierkilometer ansteigen, dann werden die ursprünglichen Einsparungen aber ganz oder teilweise wieder aufgehoben. Dieser Effekt wird **Rebound-Effekt** genannt. Das haben wir umgekehrt schon in der Pandemie beobachtet. Das Reiseangebot muss nur ausreichend unattraktiv sein, dann wird es nicht angenommen und die Emissionen sinken.

Wo stehen wir?

Deutschland hat sich viel vorgenommen. Der Ausstieg aus der Atomkraft und aus der Kohleverstromung soll gleichzeitig gelingen, während der Ausbau der erneuerbaren Energien bereits Probleme zeigt. **Der heimische erneuerbare Strom muss daher zunächst die Braunkohlekraftwerke ersetzen**. Das ist energetisch aufgrund der Wirkungsgradketten sinnvoller als den erneuerbaren Strom im Flugzeug einzusetzen (Bild 10). Andererseits muss die Luftfahrt aber auch ihren Beitrag liefern. Die heute noch erdölexportierenden Länder könnten sich auf die Erzeugung von öko-zertifizierten E-Fuels verlagern. Hier könnten sich die Airlines versorgen. Entsprechende Angebote sind aber noch nicht in Sicht und die politischen Umstände sind risikobehaftet. Der zertifizierte zusätzliche Ökostrom könnte genutzt werden, um mithilfe von Direct Air Capture (DAC) E-Fuels (SAF) herzustellen. Durch den Kohlenstoffkreislauf würde kein weiteres CO2 in die Atmosphäre gebracht werden. Durch die Nicht-CO2-Effekte wird das Klima aber weiter angeheizt. **Ohne eine Reduktion der Passagierzahlen kann die Luftfahrt ihre Klimaziele** daher **nicht erreichen**.

Patentlösungen gibt es nicht. **Die Hoffnung, dass es die Technik schon richten wird, ist leider unbegründet**. Schön wäre es, wenn es gelänge, die Umweltherausforderungen in den Griff zu bekommen, während sowohl die Flugzeugflotten als auch unsere Reisegewohnheiten so bleiben könnten wie bisher. So wird es aber nicht kommen. Die Einsicht scheint sich durchgesetzt zu haben, dass es bei einem "weiter so" nicht unbedingt gut ausgeht – zumindest nicht für die jetzt noch junge Generation. Hersteller werden weiter an Effizienzsteigerungen arbeiten, die aber vom Luftverkehrswachstum mehr als kompensiert werden. Luftverkehrsgesellschaften werden weiter den Flugbetrieb optimieren, aber nur hinsichtlich der Kosten, was nicht immer auch gleichzeitig optimal für die Umwelt ist. Sie verweigern sich bisher hinsichtlich der Möglichkeit Aviation-Induced Cloudiness (AIC) durch tieferes Fliegen zu vermeiden. **So hängt es wieder an den Passagieren mit den Füßen abzustimmen**. Das setzt ein **unabhängiges Verständnis der Zusammenhänge** voraus. Es ist nicht einfach dieses Verständnis zu erlangen, wo Interessengruppen ihre eigene Sicht der Dinge mit Macht verbreiten.

Welche Ideen und Lösungsmöglichkeiten gibt es?

Auch wenn Sustainable Aviation Fuel (SAF) als Lösung der Umweltfragen der Luftfahrt problematisch ist (s. o.), so muss der Weg dahin wenigstens mit Pilotanlagen zur SAF-Produktion gegangen werden. Deutschland könnte Technologieführer in der Herstellung von **Anlagen zur SAF-Produktion und für Anlagen zum Direct Air Capture (DAC)** werden. Solche Anlagen könnten dann **in Deutschland produziert und in die Länder exportiert werden, von denen wir dann SAF mit Zertifikat importieren könnten**.

Die Emissionen der Luftfahrt kann man letztlich nur durch eine Reduktion des Luftverkehrs in den Griff bekommen (s. o.). Dabei ist es hilfreich die **ungleiche Verteilung der Flüge und Emissionen** zu verstehen. 1 % der Weltbevölkerung verursacht 50 % der CO_2-Emissionen der Zivilluftfahrt (Gössling 2020). 1 % der EU-Bevölkerung verursachten 41 % der CO_2-Emissionen (Hopkinson 2020). Passagiere aus 5 Nationen teilen sich 33 % der internationalen Flüge (IATA 2019). Es sind also die Vielflieger, die für einen überproportionalen Anteil der Emissionen verantwortlich sind (BBC 2021). **Vielfliegerprogramme** mögen für die Fluggesellschaften Kundenbindung bringen, sind aber in Zeiten des Klimawandels nicht mehr zeitgemäß und **gehören auf den Prüfstand**. Im Extremfall führen Vielfliegerprogramme zu suchtartigem Verhalten, wenn "Mile Runners" (Fox 2015) ihr Selbstwertgefühl in fragwürdiger Weise mit ihren Vielfliegerstatus aufwerten wollen.

Es stellt sich die Frage: **Kann Fliegen verboten oder gesetzlich eingeschränkt werden?** Gibt es ein Grundrecht auf Flugreisen? Ein eigenständiges Grundrecht auf Mobilität mit einem bestimmten Verkehrsmittel gibt es nicht. Mobilität muss aber grundsätzlich vom Gesetzgeber gewährleistet werden und ist als individuelle Freiheitsausübung geschützt. Das Flugzeug mag auf bestimmten Strecken die einzige Transportmöglichkeit sein, wodurch ein Ersatz der Flugreisen durch ein anderes Verkehrsmittel nicht möglich ist. Generell geht es um die Entfaltung der Persönlichkeit, Selbstbestimmung, Teilhabe, Interaktion, Kommunikation, Berufsfreiheit, Versammlungsfreiheit, Vertragsfreiheit, Ausreisefreiheit und um das Existenzminimum (an Mobilität). Unsere Verfassung geht davon aus, dass jeder Mensch zunächst bis zur Freiheit des anderen frei ist. Der Staat hat aber auch eine Schutzpflicht von Leben und Gesundheit der Bürgerinnen und Bürger. Diese Schutzpflicht ist relevant, wenn Menschen Emissionen oder dem Klimawandel ausgesetzt sind. "Die 'Mobilitätsfreiheit' ist deshalb kein spezielles, unbenanntes Grundrecht, sondern vielmehr eine weitere Konkretisierung der Allgemeinen Handlungsfreiheit des Art. 2 Abs. 1 GG." "**Es zeigt sich, dass dem Staat von verfassungsrechtlicher Seite her viele Möglichkeiten offenstehen eine Verkehrswende zu bewirken.** Hierbei schränken grundrechtliche Gewährleistungen von Mobilität den Gesetzgeber in seinen Handlungsoptionen durch Eingriffe in Grundrechte weniger ein, sondern sind für ihn vielmehr Ansporn und Wegweiser, innovative Konzepte für die Mobilität ... zu finden." (Greitens 2018, Hervorhebung durch den Verfasser)

Der Staat kann Verhalten durch Steuern und Abgaben lenken. Eine **Besteuerung des Kraftstoffes** wäre einfach realisierbar. Abschätzungen (EU 2021g) haben ergeben, dass nur ca. 0,65 % der Einnahmen aus der Kerosinsteuer für deren Administration anfallen würden. Das liegt daran, dass es nur eine überschaubare Anzahl an Stellen gibt, an denen Kerosin verkauft wird. Eine Kerosinsteuer würde jeden finanziell mit dem Anteil treffen, der auch dem Kerosinverbrauch entspricht. Die Einführung einer Kerosinsteuer würde für mehr Gerechtigkeit im Wettbewerb verschiedener Verkehrsträger sorgen. Die EU hat bei ihren Vorschlägen im Blick, dass es möglichst nicht zu einer Verlagerung von Verkehr hin zu außereuropäischen Airlines kommen darf. Stichwort: "Level Playing Field for Sustainable Air Transport" (EU 2021h).

Wir kennen aus dem Steuerrecht, dass es einen **Grundfreibetrag** gibt – sozusagen ein garantiertes Existenzminimum des Fliegens – **gefolgt von einer progressiven Besteuerung**. Auf das Fliegen übertragen, müsste man die (äquivalenten?) **CO2-Emissionen pro Jahr** ermitteln und dann entsprechend **besteuern**. Ein Grundfreibetrag würde auch ärmeren Teilen der Bevölkerung weiterhin die Teilhabe am Luftverkehr bei gleichen Kosten sichern. Durchschnittsverdiener würden bei exzessivem Flugverhalten finanziell ausgebremst werden. Superreiche würden zahlen, was gefordert ist und weitermachen wie bisher. Geschäftliche Flüge könnten den Firmen angerechnet werden und nicht den Einzelpersonen, die als Angestellte möglicherweise weder bei der Häufigkeit der Reise noch bei der Wahl des Verkehrsmittels entscheiden. Einnahmen sollten zweckdienlich verwendet werden. Entsprechende Vorschläge liegen vor (Possible 2021). Die administrativen Hürden sind hoch und bekannt: Komplexität, Datenschutz, korrekte Zuordnung zum Passagier und diverse notwendige Ausnahmegenehmigungen, die zu organisieren wären (BBC 2021).

Analog zu den CO2-Zertifikaten, die kostenlos an die Industrie ausgegeben wurden, **könnte jede Person ein CO2-Budget kostenlos erhalten**. Wird das Budget überschritten müsste gezahlt werden. Es wäre dann möglich, individuelle Schwerpunkte im Leben zu setzten, denn in den persönlichen CO2-Fußabdruck gehen ein: Mobilität (Fahrten und Reisen mit verschiedenen Verkehrsmitteln), Wohnen und Heizen, Stromverbrauch, Ernährung, Konsum und Haustiere (Umweltbundesamt 2021). So bestünde theoretisch z. B. die Möglichkeit sich die Fernreise "vom Munde abzusparen". Klar ist, dass die staatliche Administration einer derartigen Abrechnung derzeit unmöglich ist und auch aus Gründen des Datenschutzes nicht gewollt sein kann.

Einfacher wäre, **auf einen Wertewandel in der Gesellschaft** zu **vertrauen**. Mehr Lokalität, mehr Bescheidenheit und Entschleunigung. Es wird weiterhin Vorreiter und Bremser geben, aber das Umdenken wird kommen mit zunehmender Evidenz des Klimawandels seiner Folgen und Kausalitäten. Schweden hat den Anfang gemacht und die junge Generation mit Fridays for Future. Der Begriff "**Flugscham**" hat sich etabliert. Der Wertewandel wird aber eher von einem selbstbewussten Verstehen der Umstände getragen werden, als von unserem Gewissen, dass ein Schamgefühl generiert. Reisen in ferne Länder werden nicht mehr automatisch Anerkennung

hervorrufen erklärt Prof. Nawrocki (2021), Dozent in den Fächern "Regenerative Energiesysteme" und "Postwachstumsökonomie". **"Viel CO2 – viel Ehr'" war gestern**. Es wird stattdessen bald zum guten Benehmen gehören, in eine Reisebeschreibung eine kurze Erklärung der Notwendigkeit und der Anstrengungen zur CO2-Minimierung einfließen zu lassen. Zu hoffen wäre, dass Politik und öffentliche Stellen sich in eine sachliche Informationsverbreitung zum Thema einbringen. Hinweise wie von Verkehrsminister Andreas Scheuer: "Ich warne auch davor, jetzt Flugscham zu fördern" (FAZ 2019), sind wenig hilfreich und bedienen nur die Interessen der Verbände.

Die Luftverkehrswirtschaft kämpft gegen "Flugscham" (Hagagy 2019). Die International Air Transport Association (IATA) hat dazu die Seite https://www.flyaware.com/your-journey im Internet erstellt. **Erster Hinweis an die Passagiere: "Kompensieren"!** Das Ergebnis für die Umwelt ist fragwürdig (siehe oben). Scott Kirby, CEO von United Airlines beschreibt es so: "And what I hate about traditional carbon offset programmes is so many companies are using them, and they are a fig leaf for a CEO to write a check, check a box, pretend that they've done the right thing for sustainability when they haven't made one wit of difference in the real world." (CAPA 2021) Bedenklich an der IATA-Kampagne ist, dass die Verantwortung für das Kompensieren (wenn es denn sein soll) auf die Passagiere geschoben wird. **Zweiter Hinweis an die Passagiere: "weniger einpacken"!** Richtig ist natürlich, das jedes Kilogramm hilft. Aber das Argument "just a kilo less, once multiplied across every passenger and every flight, can make a huge difference to CO2 emissions" ist banal. Natürlich wird jeder kleine Effekt größer, wenn man ihn multipliziert. Diese Betrachtung hilft stattdessen weiter: Schon bei enger Bestuhlung kommen zwischen 300 kg und 1000 kg der Abflugmasse des Flugzeugs auf jeden Passagier. Statistisch sind das im Durchschnitt etwa 500 kg. Der Wert hängt von der Reichweite und der Technik des Flugzeugs ab. **Mit einem Kilogramm weniger an Gepäck kann man daher grob 0,2 %** (=1/500) **der persönlich zu verantwortenden Emissionen einsparen**.

Was können wir selbst konkret tun?

Das ist konkret möglich:

- weniger fliegen (z. B. Ersatz des Fluges durch eine Videokonferenzen; Urlaub in der Nähe des Wohnortes),
- in der Touristenklasse fliegen (wenig Kabinenfläche in Anspruch nehmen),
- die Notwendigkeit insbesondere von Langstreckenflügen hinterfragen,
- Direktflüge wählen statt Umwege und Zwischenstopps,
- Flugzeuge meiden, die das letzte an Reichweite herausquetschen und dafür mit deutlich verminderter Anzahl an Sitzen unterwegs sind (Verbrauch pro Sitz ist hoch),
- Kurzstrecken mit dem Flugzeug meiden (Verbrauch pro km ist hoch),
- Rail&Fly nutzen (Anreise zum internationalen Flughafen mit der Bahn),

- neue effiziente Flugzeuge wählen (aber: die alten Flugzeuge fliegen irgendwo anders),
- Low Cost Airlines wählen (hohe Effizienz durch enge Bestuhlung und hohe Auslastung),
- unnötiges Gepäck vermeiden (ein leichteres Flugzeug verbraucht weniger, jedes Kilogramm zählt, es bringt aber prozentual nur wenig, siehe oben),
- Angebote der Bahn auch bei längeren Strecken prüfen (Nachtzug?),
- mit Airlines ins Gespräch kommen hinsichtlich der Vermeidung von Aviation-Induced Cloudiness (AIC) durch etwas tieferes und langsameres Fliegen (die Klimawirkung der Flüge jetzt reduzieren bevor das Klima kippt).

Literaturverzeichnis

AIRBUS, 2018. *The Future is Electric*. 2018-07-17.
Available from: https://bit.ly/3i7qo99
Archived at: https://perma.cc/V36S-7UVR

AIRBUS, 2020a. *Our Decarbonisation Journey Continues: Looking Beyond E-Fan X* (E-Fan X Cancelled). 2020-04-24.
Available from: https://bit.ly/3wFDmjU
Archived at: https://perma.cc/CPS5-RB94

AIRBUS, 2020b. *ZEROe – Towards the World's First Zero-Emission Commercial Aircraft* (with Hydrogen). 2020-09-21.
Available from: https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html
Archived at: https://perma.cc/HJ6L-3HUB

AIRBUS, 2021. *Green Stimulus Overview – F. Timmermans* [EU] *Cabinet Briefing*. 2021-02-09.
Available from: https://bit.ly/3yWH761
Archived at: https://perma.cc/2G6J-76DA

ATAG, 2012. *Summit Declaration: Towards Sustainable Aviation* (PDF for Downlaod).
Available from: https://bit.ly/2UJGu0W
Archived at: https://perma.cc/6TDN-KGEN

BBC, 2021. *A Few Frequent Flyers 'Dominate Air Travel'*. 2021-03-31.
Available from: https://www.bbc.com/news/science-environment-56582094
Archived at: https://perma.cc/KV3M-VSWX

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft BDL, 2013. *Die-Vier-Liter-Flieger.de - Die Berechnungen.*
Available from: https://bit.ly/3AnH8BC (archived)

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL), 2021a. *PtL-Roadmap für den deutschen Luftverkehr.*
Available from: https://www.bdl.aero/de/publikation/ptl-roadmap
Archived at: https://perma.cc/3B5T-9P5E

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL), 2021b. *Masterplan Klimaschutz im Luftverkehr - Maßnahmen für einen CO2-neutralen Luftverkehr*.
Available from: https://www.bdl.aero/de/themen-positionen/nachhaltigkeit/klimaschutz
Archived at: https://perma.cc/Z4VE-34JA

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2021. *PtL-Roadmap - Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland.*
Available from: https://bit.ly/2UM0TSM
Archived at: https://perma.cc/MLX8-ERMN

BRANDANI, Stefano, 2012. Carbon Dioxide Capture from Air: A Simple Analysis. In: *Energy & Environment*, vol. 23, no. 2-3, pp 319-328.
Available from: https://doi.org/10.1260/0958-305X.23.2-3.319 (Closed Access)
via
Science Advice for Policy by European Academies (SAPEA), 2018. *Novel Carbon Capture and Utilisation Technologies: Research and Climate Aspects*. Berlin: SAPEA.
Available from: https://doi.org/10.26356/CARBONCAPTURE

CAPA, 2021. United's Kirby: *Carbon Offsets "A Fig Leaf for a CEO to Write a Check"*. 2021-03-21.
Available from: https://bit.ly/3ehrDle
Archived at: https://perma.cc/WX7A-PMKE

CARBON BRIEF, 2017. *The Swiss Company Hoping to Capture 1% Of Global CO2 Emissions by 2025*.
Available from: https://bit.ly/3eiE4gC
Archived at: https://perma.cc/LH7L-NEDK

CITY POPULATION, 2020. *Passenger Traffic by Air*.
Verfügbar über: https://www.citypopulation.de/en/world/bymap/airtrafficpassengers
Archiviert als: https://perma.cc/EZQ7-GTUT

COPERNICUS, 2020. *Copernicus: 2020 Warmest Year on Record for Europe; Globally, 2020 Ties with 2016 for Warmest year Recorded.*
Available from: https://bit.ly/3rcOjZ9

Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA), 2021. *European Commission Publishes "Fit for 55" Legislative Package*. 2021-07-14.
Available from: https://bit.ly/3xQtJQQ
Archived at: https://perma.cc/KSC9-5YJ5

European Environment Agency (EEA), 2019. *Greenhouse Gas Emissions by Aggregated Sector* (data only).
Available from: https://bit.ly/3hB5S1E
Archived at: https://perma.cc/2EZ6-DQBN

European Environment Agency (EEA), 2020. *Transport and Environment Report 2020 – Train or Plane?*
Available from: https://doi.org/10.2800/983906

European Parliament Research Service (EPRS), 2020: *Briefing - Sustainable Aviation Fuels*.
Available from: https://bit.ly/3wNtcO9
Archived at: https://perma.cc/D54K-Z9U7

EU, 2019a. *Sustainable Mobility – The European Green Deal*.
Available from: https://doi.org/10.2775/395792

EU, 2019b. *Communication from the Commission – The European Green Deal*.
Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2019:640:FIN

EU, 2019c. *Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)*.
Available from: https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii
Archived at: https://perma.cc/6NC2-H26L

EU, 2020a. *Communication from the Commission – Stepping Up Europe's 2030 Climate Ambition: Investing In a Climate-Neutral Future for the Benefit of Our People*.
Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:562:FIN

EU, 2020b. *Sustainable Aviation Fuels – ReFuelEU Aviation – Public Consultation*.
Available from: https://bit.ly/2T946vu
Archived at: https://perma.cc/FN75-7UXA?type=image

EU, 2020c. *Hydrogen-Powered Aviation*.
Available from: https://doi.org/10.2843/471510

EU, 2021a. *Assessment of ICAO's Global Market-Based Measure (CORSIA) Pursuant to Article 28b and for Studying Cost Pass- Through Pursuant to Article 3d of the EU ETS Directive*.
Available from: https://bit.ly/3xFc12l
Archived at: https://perma.cc/HWC7-F2FA

EU, 2021b. *Europäischer Grüner Deal: Kommission schlägt Neuausrichtung von Wirtschaft und Gesellschaft in der EU vor, um Klimaziele zu erreichen*. 2021-07-14.
Available from: https://bit.ly/3ksySL5
Archived at: https://perma.cc/RZS9-8UL5

EU, 2021c. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2003/87/EC as Regards Aviation's Contribution to the Union's Economy-Wide Emission Reduction Target and Appropriately Implementing a Global Market-Based Measure*. 2021-07-14.
Available from: https://bit.ly/3eujZDZ
Archived at: https://perma.cc/6U2A-TMWU

EU, 2021d. *Make Transport Greener*.
Available from: https://bit.ly/3epkGyj
Archived at: https://perma.cc/MZ44-SLZT

EU, 2021e. *Reducing Emissions from Aviation*.
Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation_en#tab-0-0
Archived at: https://perma.cc/MP6U-UH6J

EU, 2021f. *Revision of the Energy Taxation Directive (ETD)*. 2021-07-14.
Available from: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3662
Archived at: https://perma.cc/SN8H-RMRQ?type=image

EU, 2021g. *Proposal for a Council Directive Restructuring the Union Framework for the Taxation of Energy Products and Electricity (Recast)*. 2021-07-14.
Available from: https://bit.ly/3z9hxdY
Archived at: https://perma.cc/GXZ5-WAKA

EU, 2021h. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Ensuring a Level Playing Field for Sustainable Air Transport* [SAF Mandate]. 2021-07-14.
Available from: https://bit.ly/3hJOXtO
Archived at: https://perma.cc/WRY9-EV8L

EU, 2021i. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions 'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*. 2021-07-14.
Available from: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/chapeau_communication.pdf
Archived at: https://perma.cc/92NW-WRUE

FERN, 2017. *Unearned Credit - Why Aviation Industry Forest Offsets Are Doomed to Fail*.
Available from: https://bit.ly/3ifqdJg
Archived at: https://perma.cc/84ML-FXJD

FLIGHT, 2021a. *'Carrot and Stick' Needed to Boost Saf Use: GE Aviation Chief Slattery --- "Nirvana of Zero-Carbon Flight"*. 2021-06-24.
Available from: https://bit.ly/3yZRWUG
Archived at: https://perma.cc/E2YR-HBNW?type=image

FLIGHT, 2021b. *Mid-2030s Zero-Emission Aircraft Horizon 'Credible': Airbus Chief*. 2021-03-31.
Available from: https://bit.ly/2UdQyPA
Archived at: https://perma.cc/Z5T3-N5FU?type=image

FOX, 2015. *Mile Runners Take Frequent Flyer Mileages to a Whole New Height*. 2015-11-06.
Available from: https://fxn.ws/2T9tS2y
Archived at: https://perma.cc/ZQ6L-EYDK

FRAUNHOFER ISI, 2020. *Methodology for GHG Efficiency of Transport Modes*. Contract EEA/ACC/18/001/LOT 1
Available from: https://bit.ly/3hJQQqJ
Archived at: https://perma.cc/L5C8-Y3YV

GÖSSLING, Stefan, HUMPED, Andreas, 2020. The Global Scale, Distribution and Growth of Aviation: Implications for Climate Change. In: *Global Environmental Change*, vol. 65, no. 10/2020, paper 102194.
Available from: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102194

GREITENS, Arlette G., 2018. Grundrecht auf (Auto-)Mobilität? In: *Bucerius Law Journal*, vol. 2018, nr. 2, pp. 98-103
Available from: https://law-journal.de/wp-content/uploads/2020/04/BLJ-02_2018.pdf
Archived at: https://perma.cc/3VDD-HGDN

HAGAGY, Ahmed, 2019. *Aviation Industry to Counter Flight Shaming Movement: IATA Chief.* Reuters. 2019-11-05.
Available from: https://reut.rs/2ULFhWK
Archived at: https://perma.cc/F2HY-4XN2?type=image

HELMHOLTZ, 2021. *Atmosphäre der Erde.*
Available from: https://www.eskp.de/grundlagen/schadstoffe/atmosphaere-der-erde-935158

HOPKINSON, L., CAIRNS, S., 2020. *Elite Status - Global Inequalities in Flying*. Report for Possible, March 2021.
Available from: https://bit.ly/2UNxurC
Archived at: https://perma.cc/CP69-DVHR

IATA, 2009. *A Global Approach to Reducing Aviation Emissions. First Stop: Carbon-Neutral Growth from 2020.*
Available from: https://bit.ly/3kmoYKL
Archived at: https://perma.cc/42HW-ZTKF

IATA, 2019. *More Connectivity and Improved Efficiency -2018 Airline Industry Statistics Released*. 2019-07-31.
Available from: https://www.iata.org/en/pressroom/pr/2019-07-31-01
Archived at: https://perma.cc/QC74-48T7

ICAO, 2012. *Facts and Figures - World Aviation and the World Economy.*
Available from: https://bit.ly/2X81hcd
Archived at: https://perma.cc/UDZ3-U2EC

ICAO, 2020. *CORSIA and COVID-19.*
Available from: https://bit.ly/3hGbLee
Archived at: https://perma.cc/6UK4-DPLH

INFLUENCEMAP, 2021. *Aviation Industry Lobbying & European Climate Policy - How the Aviation Industry has Lobbied to Weaken and Delay Climate Regulation*.
Available from: https://influencemap.org/evoke/783334/file_proxy
Archived at: https://perma.cc/82VC-KEBR

KÖNIG, Daniel H., 2016. *Techno-ökonomische Prozessbewertung der Herstellung synthetischen Flugturbinentreibstoffes aus CO2 und H2*. Dissertation. Universität Stuttgart.
Available from: https://doi.org/10.18419/opus-9043

LEE, D.S., et al., 2021. The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing For 2000 to 2018. In: *Atmospheric Environment*, vol. 244, no. 01/2021, paper 117834.
Available from: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834

NASA, 2012. *OMEGA Project (2009-2012)*.
Available from: https://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA
Archived at: https://perma.cc/X7XU-7RFR?type=image

NAWROCKI, Rainer, 2021. Viel CO2 viel Ehr'. In: *DNH*, vol. 2021, no. 3, p. 7.
Available from: https://www.hlb.de/die-neue-hochschule
Archived at: https://perma.cc/7S7A-HVP2

NLR, 2021. *Destination 2050 - A Route To Net Zero European Aviation*. NLR-CR-2020-510.
Available from: https://bit.ly/3z2EQGB
Archived at: https://perma.cc/K8KR-U4HF

ÖKO-INSTITUT, 2013. *Working Paper: Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive.*
Available from: https://www.oeko.de/oekodoc/1826/2013-496-de.pdf
Archived at: https://perma.cc/UHC9-5K4D

ÖKO-INSTITUT, 2020. *Changes in Course Needed for UN Scheme to Address Aviation Emissions*. Blog, 2020-04-07.
Available from: https://bit.ly/3raBP4j
Archived at: https://perma.cc/6B44-WK9W

OUR WORLD IN DATA, 2020. *Where in the World Do People Have the Highest CO2 Emissions from Flying?*.
Verfügbar über: https://ourworldindata.org/carbon-footprint-flying
Archiviert als: https://perma.cc/NP3B-KF7W

POSSIBLE, 2021: *The Frequent Flight Levy: The Way to Make Fewer Flights Fair for Everyone*.
Available from: https://bit.ly/2Uaqfdd
Archived at: https://perma.cc/2DP6-GPGB

REDDY, Chris, O'NEIL, Greg [Woods Hole Oceanographic Institution], 2015: *Jet Fuel from Algae? – Scientists Probe Fuel Potential in Common Ocean Plant*.
Available from: https://www.whoi.edu/oceanus/feature/jet-fuel-from-algae
Archived at: https://perma.cc/T5SG-7NFA

Science Advice for Policy by European Academies (SAPEA), 2018. *Novel Carbon Capture and Utilisation Technologies: Research and Climate Aspects*. Berlin: SAPEA.
Available from: https://doi.org/10.26356/CARBONCAPTURE

SCHOLZ, Dieter, 2018. Evaluating Aircraft with Electric and Hybrid Propulsion. In: *UKIP Media & Events: Conference Proceedings : Electric & Hybrid Aerospace Symposium 2018* (Cologne, 08-09 November 2018), 2018.
Available from: https://doi.org/10.15488/3986

SCHOLZ, Dieter, 2020a. Review of CO2 Reduction Promises and Visions for 2020 in Aviation. In: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2020* (DLRK 2020, Online, 01 - 03.09.2020)
Available from: https://doi.org/10.5281/zenodo.4066958

SCHOLZ, Dieter, 2020b. Design of Hydrogen Passenger Aircraft – How much "Zero-Emission" is Possible? In: *Hamburg Aerospace Lecture Series* (DGLR, RAeS, VDI, ZAL, HAW Hamburg), Hamburg, Germany, 2020-11-19.
Available from: https://doi.org/10.5281/zenodo.4301103

SCHOLZ, Dieter, 2021a. *Aircraft Fuel Consumption – Estimation and Visualization*. Data Sheet with Airbus A350.
Available from: https://doi.org/10.7910/DVN/2HMEHB

SCHOLZ, Dieter, 2021b. *Equivalent CO2 from Various Sources in EU27 1990 to 2017 and Linear Projection to 2030*. Data Sheet.
Available from: https://doi.org/10.7910/DVN/QFNRYQ

SCHOLZ, Dieter, 2021c. Energy Consumption, CO2, and Equivalent CO2 – Aircraft versus Train. Data Sheet.
Available from: https://doi.org/10.7910/DVN/QFG2SD

SMITH, Pete, et al., 2015. Biophysical and Economic Limits to Negative CO2 Emissions. In: *Nature Climate Change*, vol. 6 (2016), pp. 42-50.
Available from: https://doi.org/10.1038/nclimate2870

TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2021. *Corsia: Worst Option for the Climate - Briefing on Assessment of ICAO's Offsetting Scheme*.
Available from: https://bit.ly/3xGTItU
Archived at: https://perma.cc/R3WX-MMY5

THE GEOGRAPHY OF TRANSPORT SYSTEMS, 2018. *Annual Passenger Plane Load Factor, World and United States, 1950-2018*.
Available from: https://bit.ly/3wEw0go
Archived at: https://perma.cc/5Q9R-K5HT?type=image

UECKERDT, Falko, et al., 2021. Potential and Risks of Hydrogen-Based E-fuels in Climate Change Mitigation. In: *Nature Climate Change*, vol. 11 (2021), pp. 384-393.
Available from: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7 (Closed Access)
Via https://de.wikipedia.org/wiki/E-Fuel

Umweltbundesamt (UBA), 2008: *Kipp-Punkte im Klimasystem – Welche Gefahren drohen?*
Available from: https://bit.ly/3kjXw0e
Archived at: https://perma.cc/3CHN-62MV

Umweltbundesamt (UBA), 2021. *CO2-Rechner des Umweltbundesamtes*.
Available from: https://uba.co2-rechner.de

VERDEGAAL, Wolfgang Michael [SunFire], BECKER, Sebastian, VON OLSHAUSEN, Christian, 2015. Power-to-Liquids: Synthetisches Rohöl aus CO2, Wasser und Sonne. In: *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 87, no. 4, Special Issue: Energiewende, April, 2015, pp. 340-346.
Available from: https://doi.org/10.1002/cite.201400098

WESOFF, Eric, 2017. *Hard Lessons From the Great Algae Biofuel Bubble*. Greentech Media.
Available from: https://bit.ly/3ifP8wi
Archived at: https://perma.cc/KSC5-PPQL

WIKIPEDIA 2021:
https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid_in_der_Erdatmosphäre
https://de.wikipedia.org/wiki/Klimasensitivität
https://de.wikipedia.org/wiki/CO2-Budget
und weitere dort aufgeführte Referenzen